



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

WILLIAM MONTE VERDE

# **MODELAGEM DO DESEMPENHO DE BOMBAS DE BCS OPERANDO COM MISTURAS GÁS- ÓLEO VISCOZO**

CAMPINAS

2016

WILLIAM MONTE VERDE

# **MODELAGEM DO DESEMPENHO DE BOMBAS DE BCS OPERANDO COM MISTURAS GÁS- ÓLEO VISCOZO**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo, na área de Exploração.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart

Este exemplar corresponde à versão final da Tese defendida pelo aluno William Monte Verde e orientada pelo Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart.



---

Assinatura do Orientador

CAMPINAS

2016

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** FUNCAMP, 193755

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

Monte Verde, William, 1987-  
M764b Modelagem do desempenho de bombas de BCS operando com misturas  
gás-óleo viscoso / William Monte Verde. – Campinas, SP : [s.n.], 2016.

Orientador: Antonio Carlos Bannwart.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Bombas centrífugas. 2. Bomba centrífuga submersa. 3. Escoamento. 4.  
Escoamento bifásico. 5. Curvas. I. Bannwart, Antonio Carlos, 1955-. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Performance modeling of ESP pumps performance operating with  
gas-viscous liquid mixtures

**Palavras-chave em inglês:** Centrifugal

pumps

Electrical submersible pump

Flow

Two-phase flow

Curves

**Área de concentração:** Exploração

**Titulação:** Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo

**Banca examinadora:**

Antonio Carlos Bannwart [Orientador]

Ricardo Augusto Mazza

Erick de Moraes Franklin

Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales

Valdir Estevam

**Data de defesa:** 26-08-2016

**Programa de Pós-Graduação:** Ciências e Engenharia de Petróleo

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TESE DE DOUTORADO

# **MODELAGEM DO DESEMPENHO DE BOMBAS DE BCS OPERANDO COM MISTURAS GÁS- ÓLEO VISCOZO**

Autor: William Monte Verde

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

**Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart, Presidente**  
**DE/FEM/UNICAMP**

**Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza**  
**DE/FEM/UNICAMP**

**Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin**  
**DE/FEM/UNICAMP**

**Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales**  
**DAMEC/CT/UTFPR**

**Dr. Valdir Estevam**  
**E&P-CORP/EEPIP/EE/PETROBRAS**

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 26 de Agosto de 2016



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha mais que amada família, em especial ao meu avô, Antenor Monte Verde (*in memoriam*), um grande incentivador.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo carinho e pelo apoio irrestrito a todas as minhas decisões.

Ao prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart, pela oportunidade de ser seu orientando e pelo apoio durante todas as etapas deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza, Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin, Prof. Dr. Rigoberto Eleazar Melgarejo Morales e Dr. Valdir Estevam, pela disponibilidade e contribuições ao trabalho.

À Petrobras, pelo apoio ao projeto de pesquisa, em específico ao Dr. Valdir Estevam, pelas relevantes contribuições desde o início do trabalho.

À Statoil Brasil, pelo apoio ao projeto de pesquisa.

Ao prof. Dr. Oscar Maurício Rodriguez da EESC/USP e ao prof. Dr. Marcelo de Souza Castro, pelo empréstimo da câmera de alta velocidade que contribuiu para a obtenção dos resultados desta tese.

Aos pesquisadores do LABPETRO/LGE, Dra. Natache Arrifano Sassim, Dra. Vanessa Bizotto Guersoni, Dr. Carlos Perles e, em especial, a um grande amigo, Dr. Jorge Luiz Biazussi, pelas incontáveis discussões que foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

A todos os integrantes do LABPETRO, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, não apenas na parte técnica, mas também pelas horas descontraídas de trabalho em um ambiente muito sadio, Matheus, Leandro Braga, Cláudio, Luís e Marta.

Aos amigos do DEP, que tornaram o período em que fiz doutorado não apenas um momento de aprendizado e sim um momento de cultivar amigos que serão levados por toda vida, Charlie, Jorge, Felipe, Darlan, Luan, Ivana, Leandro, Matheus, Maurício.

## RESUMO

O Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) é um dos principais métodos de elevação artificial utilizados na produção de petróleo. Esse método é caracterizado pelas elevadas vazões de produção, flexibilidade na instalação e consiste, basicamente, na utilização de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios para fornecer energia ao petróleo e elevá-lo até as facilidades de produção. Entretanto, algumas condições operacionais são adversas à aplicação de BCSs. A produção de poços com elevadas razões gás-óleo podem provocar a degradação do desempenho da bomba, ou, até mesmo, causar instabilidades operacionais, podendo interromper a produção. A viscosidade do fluido é outro fator responsável pela degradação do desempenho de BCSs. Sua aplicação em campos de petróleo pesado ou com elevadas frações de água, em que podem ocorrer a formação de emulsões, são exemplos da operação com fluidos de elevada viscosidade. O objetivo geral deste trabalho é avançar no entendimento dos fatores que afetam o desempenho de BCS. Para isso, foram construídas duas montagens experimentais. A primeira delas refere-se ao desenvolvimento de uma bomba protótipo, projetada para permitir a visualização do escoamento no interior dos canais do impelidor. O objetivo específico dessa montagem experimental é identificar os padrões de escoamento gás-líquido que ocorrem no interior do impelidor e relacioná-los com o desempenho da bomba. A influência da viscosidade e da tensão superficial no arranjo entre as fases, também, é investigada. A segunda montagem experimental foi desenvolvida com a finalidade de permitir a avaliação do desempenho de BCSs convencionais operando com escoamento viscoso, tanto monofásico quanto bifásico. Esse aparato experimental foi utilizado para investigar os efeitos da rotação, pressão de sucção, vazão de líquido, viscosidade e inclinação da instalação na operação da bomba. Os resultados experimentais de desempenho monofásico viscoso da bomba foram comparados com os principais métodos de correção disponíveis na literatura, sendo proposto uma metodologia de correção específica para o modelo de BCS testado. Em relação à modelagem do desempenho de BCSs, é proposta a extensão de uma abordagem disponível na literatura, de forma a completar os efeitos viscosos. O modelo baseado na análise das perdas de energia permite avaliar a elevação e a potência consumida pela bomba.

**Palavras-chave:** Bomba Centrífuga Submersa, Visualização de Escoamento, Escoamento Bifásico Gás-Líquido, Curva de Desempenho, Fatores de Correção Viscosos.

## ABSTRACT

Electric Submersible Pumping (ESP) systems are one of the main methods of artificial lift used in oil production. The method is characterized by high production flow rate and installation flexibility. It consists of using a multistage centrifugal pump to provide energy to the oil and lift it to the production facilities. However, some operating conditions are adverse to ESP applications. Wells with high gas-oil ratios may cause deterioration of pump performance, or even lead to operational instabilities that can interrupt the oil production. The viscosity of the fluid is another factor responsible for ESP performance degradation. ESP applications in high water fractions or heavy oil fields are examples of operation with high viscosity fluids, in which the formation of emulsions can occur. The aim of this project is to improve the understanding of the factors that affect ESP performance. For this, two experimental assemblies were built. The first experimental apparatus relates to the development of a prototype pump designed to allow flow visualization within the impeller channels. The specific objective of this experimental setup is to identify the gas-liquid flow patterns that occur inside the impeller and relate them to the pump performance. The influence of viscosity and surface tension between the phases are also investigated. The second experimental assembly was developed in order to allow evaluation of a conventional ESP performance operating with viscous flow, both single phase as two phase. This experimental apparatus was used to investigate the effects of rotation, suction pressure, liquid flow rate, viscosity and installation inclination on pump operation. The experimental results of pump performance operating with single-phase viscous flow were compared to the main correction methods available in the literature and a specific correction method for the ESP model tested was proposed. Regarding the modeling of the ESP performance, an extension of an available approach is proposed in order to complete the viscous effects. The model based on the analysis of energy losses allows to evaluate head produced and power consumed by the pump.

**Key-words:** Electrical Submersible Pump, Flow Visualization, Two-Phase Gas-Liquid Flow, Pump Performance, Viscosity Corrections Factors.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Instalação convencional de BCS (adaptado de Flatern, 2015).....	31
Figura 2.1 – Representação dos triângulos de velocidades no impelidor (adaptado de White, 2011).....	42
Figura 2.2 – Operação instável de bombas centrífugas operando com mistura bifásica gás-líquido.....	52
Figura 2.3 – Flutuações na pressão de saída devido à presença de gás (Monte Verde <i>et al.</i> , 2013).....	53
Figura 2.4 – Fatores de correção de elevação e eficiência no ponto do BEP (Stepanoff, 1982). .....	56
Figura 2.5 – Ábaco para correção de desempenho de bombas centrífugas de 2 a 8” operando com fluido viscoso (Hydraulic Institute, 1983). ....	58
Figura 2.6 – Fator de correção da eficiência, comparação do modelo de perdas e resultados de testes experimentais (Gulich, 2008). ....	62
Figura 2.7 – Fator de correção da elevação, comparação do modelo de perdas e resultados de testes experimentais (Gulich, 2008). ....	62
Figura 2.8 – Curva de desempenho da BCS radial I42-B operando com a mistura água-ar (Lea e Bearden, 1982).....	69
Figura 2.9 – Curva de desempenho da BCS radial I42-B operando com a mistura água-ar (Lea e Bearden, 1982).....	71
Figura 2.10 – Desempenho da BCS GN4000 para diferentes números de estágios, fração de gás de 15% e pressão de sucção de 200 psig (Cirilo, 1989).....	73
Figura 2.11 – Incremento de pressão por estágio para BCS operando com mistura bifásica água-ar (Pessoa e Prado, 2001).....	74
Figura 2.12 – Mapeamento dos padrões de escoamento bifásico no canal do impelidor de uma bomba, operando com água e ar, indicando as fronteiras para a ocorrência de <i>Surging</i> e bloqueio de gás no canal do impelidor (Estevam, 2002).....	75
Figura 2.13 – Curva de desempenho da BCS GC6100 operando com mistura água-ar, rotação de 3000 rpm, vazão de gás de 50000 scfd e pressão de sucção de 200 psi (Duran, 2003).....	76
Figura 2.14 – Representação esquemática do impelidor mostrando a bolha alongada e a região com escoamento em bolhas dispersas (Estevam, 2002). ....	81

Figura 2.15 – Visualização do escoamento no interior dos canais do impelidor (Barrios, 2007).....	84
Figura 2.16 – Padrões de escoamento gás-líquido em impelidores de BCSs (Gamboa, 2008). .....	86
Figura 2.17 – Padrão <i>Bubble Flow</i> (Trevisan, 2009). ....	87
Figura 2.18 – Padrão <i>Agglomerated Bubbles</i> (Trevisan, 2009). ....	88
Figura 2.19 – Padrão <i>Gas Pocket</i> (Trevisan, 2009).....	88
Figura 2.20 – Padrão <i>Segregated Gas</i> (Trevisan, 2009).....	88
Figura 2.21 – Padrão <i>Intermittent Gas</i> (Trevisan, 2009).....	89
Figura 2.22 – Padrões de escoamento gás líquido observados no interior de uma bomba axial de três estágios (Zhang et al., 2015). (a) <i>Isolated bubble flow</i> , $\omega=2700$ rpm e $\lambda=0,8$ %. (b) <i>Bubbly flow</i> , $\omega=2100$ rpm e $\lambda=8$ %. (c) <i>Gas pocket flow</i> , $\omega=2400$ rpm e $\lambda=23$ %. (d) <i>Segregated gas flow</i> , $\omega=2700$ rpm e $\lambda=42$ % . ....	91
Figura 3.1 – Padrões Principais dimensões do impelidor da BCS P23. ....	93
Figura 3.2 – Estágio original da BCS P23.....	94
Figura 3.3 – Projeto do protótipo de visualização. ....	95
Figura 3.4 – Janela de visualização no impelidor.....	96
Figura 3.5 – <i>Layout</i> da Montagem Experimental A. ....	97
Figura 3.6 – Vista geral da Montagem Experimental A.....	98
Figura 3.7 – Interface gráfica do programa de monitoramento e aquisição de dados. ....	101
Figura 3.8 – Câmera de alta velocidade e sistema de iluminação. ....	104
Figura 3.9 – Comportamento reológico da solução água/glicerina nas temperaturas de 5 e 40°C. ....	106
Figura 3.10 –Viscosidade em função da temperatura para solução água/glicerina. ....	106
Figura 3.11 – Massa específica em função da temperatura para solução água/glicerina. ....	107
Figura 3.12 – Tensão superficial em função da temperatura para a solução água/glicerina e o ar. ....	108
Figura 3.13 – Tensão superficial em função da fração mássica de isopropanol na solução. .	109
Figura 3.14 – Padrão de escoamento <i>Bubble Flow</i> . ....	116
Figura 3.15 – Padrão de escoamento <i>Agglomerated Bubble Flow</i> .....	117
Figura 3.16 – Padrão de escoamento <i>Gas Pocket Flow</i> . ....	118
Figura 3.17 – Padrão de escoamento <i>Segregated Flow</i> .....	119
Figura 3.18 – Escoamento no interior do canal do impelidor para o padrão <i>Segregated Flow</i> . .....	120

Figura 3.19 – Padrões de escoamento gás-líquido no impelidor BCS. (a) <i>Bubble Flow</i> , (b) <i>Agglomerated Bubble Flow</i> , (c) <i>Gas Pocket Flow</i> , (d) <i>Segregated Flow</i> .....	121
Figura 3.20 – Esferoide prolato e esfera de diâmetro equivalente .....	122
Figura 3.21 – Distribuição do tamanho das bolhas. ....	123
Figura 3.22 – Desempenho da bomba protótipo operando com escoamento monofásico de água nas rotações de 600, 900, 1200 e 1500 rpm. ....	125
Figura 3.23 – Desempenho adimensional da bomba protótipo operando com escoamento monofásico de água em comparação com o desempenho da BCS P23.....	125
Figura 3.24 – Desempenho da bomba protótipo operando com mistura bifásica água-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P_1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,050 \text{ kg/h}$ .....	127
Figura 3.25 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P_1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,050 \text{ kg/h}$ . ....	129
Figura 3.26 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica água-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P_1 = 150 \text{ kPa}$ e diferentes vazões mássicas de gás.....	131
Figura 3.27 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica no teste de vazão de líquido constante, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P_1 = 150 \text{ kPa}$ e $qL = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ . ....	132
Figura 3.28 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P_1 = 150 \text{ kPa}$ e $qL = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	134
Figura 3.29 – Desempenho da bomba protótipo operando com mistura bifásica no teste de vazão de líquido constante nas rotações de 900, 1200 e 1500 rpm. ....	134
Figura 3.30 – Visualização do escoamento para a bomba operando com mistura bifásica gás-líquido no teste de vazão de líquido constante nas rotações de 900, 1200 e 1500 rpm.....	135
Figura 3.31 – Balanço de forças aplicado em uma bolha no interior do impelidor de uma bomba centrífuga. ....	137
Figura 3.32 – Desempenho monofásico da bomba protótipo operando com solução água/glicerina, $\omega = 900 \text{ rpm}$ e viscosidades de 13, 20, 32 e 50 cP.....	138
Figura 3.33 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura água/glicerina-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P_1 = 150 \text{ kPa}$ , $\mu = 13 \text{ cP}$ e diferentes vazões de ar.....	139
Figura 3.34 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, $\mu = 13 \text{ cP}$ , $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P_1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,0125 \text{ kg/h}$ . ....	141
Figura 3.35 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, diferentes vazões de gás, $\mu = 20 \text{ cP}$ , $\omega = 900 \text{ rpm}$ e $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ...	142

Figura 3.36 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, $\mu = 20 \text{ cP}$ , $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,025 \text{ kg/h}$	144
Figura 3.37 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, $\mu = 32 \text{ cP}$ , $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,0125 \text{ kg/h}$ .	145
Figura 3.38 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, $\mu = 32 \text{ cP}$ , $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,0125 \text{ kg/h}$ .	146
Figura 3.39 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, $\mu = 52 \text{ cP}$ , $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,0125 \text{ kg/h}$ .	147
Figura 3.40 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, $\mu = 52 \text{ cP}$ , $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,0125 \text{ kg/h}$ .	148
Figura 3.41 – Desempenho monofásico da bomba protótipo operando com solução de isopropanol em água. Fluidos 1, 2 e 3, e $\omega = 900 \text{ rpm}$ .	149
Figura 3.42 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica Fluido 1-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e diferentes vazões mássicas de gás.	150
Figura 3.43 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica Fluido 2-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e diferentes vazões mássicas de gás.	151
Figura 3.44 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica Fluido 3-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e diferentes vazões mássicas de gás.	152
Figura 3.45 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica com água, Fluido 1 e Fluido 3-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,025 \text{ kg/h}$ .	153
Figura 3.46 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando mistura bifásica com água-ar, Fluido 1-ar e Fluido 3-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,025 \text{ kg/h}$ .	154
Figura 3.47 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica com água, Fluido 1 e Fluido 3-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,075 \text{ kg/h}$ .	155
Figura 3.48 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando mistura bifásica com água-ar, Fluido 1-ar e Fluido 3-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 = 150 \text{ kPa}$ e $mG = 0,075 \text{ kg/h}$ .	156
Figura 4.1 – <i>Layout</i> da Montagem Experimental B.	159
Figura 4.2 – Projeto do <i>Skid</i> de testes de BCSs.	160



Figura 4.3 – <i>Skid</i> de testes montados na configuração vertical. ....	160
Figura 4.4 – Desempenho da BCS GN5200 operando a 3500 rpm conforme catálogo do fabricante. ....	162
Figura 4.5 – Estágio da BCS GN5200.....	163
Figura 4.6 – Instrumentação da BCS GN5200.....	164
Figura 4.7 – Modificações realizadas nos estatores 1 e 2 (dimensões dadas em mm).....	165
Figura 4.8 – Interface gráfica do programa de monitoramento e aquisição de dados.....	168
Figura 4.9 – Comportamento reológico da glicerina nas temperaturas de 5 e 60 °C. ....	169
Figura 4.10 – Viscosidade da glicerina em função da temperatura.....	170
Figura 4.11 – Massa específica da glicerina em função da temperatura. ....	171
Figura 4.12 – Tensão superficial glicerina/ar em função da temperatura. ....	171
Figura 4.13 – Calor específico da glicerina em função da temperatura. ....	172
Figura 4.14 – Comportamento reológico da solução de água em glicerina nas temperaturas de 10 e 30 °C. ....	173
Figura 4.15 – Viscosidade da solução de água em glicerina em função da temperatura. ....	173
Figura 4.16 – Massa específica da solução de água em glicerina em função da temperatura. ....	174
Figura 4.17 – Tensão superficial da solução de água e glicerina e o ar em função da temperatura. ....	174
Figura 4.18 – Curvas características de elevação para a BCS GN5200 operando com água. ....	179
Figura 4.19 – Curvas características de potência para a BCS GN5200 operando com água. ....	180
Figura 4.20 – Curvas características de eficiência para a BCS GN5200 operando com água. ....	180
Figura 4.21 – Comparação entre o desempenho experimental e o previsto pelo fabricante para a BCS GN5200 operando com água na rotação de 3500 rpm. ....	181
Figura 4.22 – Elevação adimensional da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm. ....	182
Figura 4.23 – Potência adimensional da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm. ....	182
Figura 4.24 – Eficiência adimensional da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm. ....	183
Figura 4.25 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 1800 rpm.....	184

Figura 4.26 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 2400 rpm.....	184
Figura 4.27 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 3000 rpm.....	185
Figura 4.28 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 3500 rpm.....	185
Figura 4.29 – Elevação adimensional do 1º estágio da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm. ....	186
Figura 4.30 – Elevação adimensional do 2º estágio da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm. ....	186
Figura 4.31 – Elevação adimensional do 3º estágio da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm. ....	187
Figura 4.32 – Elevação adimensional do impelidor e estator do 2º estágio. ....	187
Figura 4.33 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1200 rpm.....	189
Figura 4.34 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1200 rpm.....	189
Figura 4.35 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1200 rpm.....	190
Figura 4.36 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1800 rpm.....	191
Figura 4.37 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1800 rpm.....	191
Figura 4.38 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1800 rpm.....	192
Figura 4.39 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 2400 rpm.....	192
Figura 4.40 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 2400 rpm.....	193
Figura 4.41 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 2400 rpm.....	193
Figura 4.42 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3000 rpm.....	194

Figura 4.43 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3000 rpm.....	194
Figura 4.44 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3000 rpm.....	195
Figura 4.45 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3500 rpm.....	195
Figura 4.46 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3500 rpm.....	196
Figura 4.47 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3500 rpm.....	196
Figura 4.48 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200 na rotação de 1200 rpm e viscosidades de 76, 356 e 1057 cP. ....	197
Figura 4.49 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200 na rotação de 3500 rpm e viscosidades de 76, 352 e 832 cP. ....	198
Figura 4.50 – Incremento de pressão do estator e impelidor do segundo estágio BCS GN5200 na rotação de 1200 rpm e viscosidades de 76, 356 e 1057 cP.....	198
Figura 4.51 – Incremento de pressão do estator e impelidor do segundo estágio BCS GN5200 na rotação de 3500 rpm e viscosidades de 76, 352 e 832 cP.....	199
Figura 4.52 – Aquecimento do fluido de trabalho através da BCS GN5200, operando a 2400 rpm.....	200
Figura 4.53 – Aquecimento do fluido de trabalho através da BCS GN5200, operando a 3000 rpm.....	201
Figura 4.54 – Aquecimento do fluido de trabalho através da BCS GN5200, operando a 3500 rpm.....	201
Figura 4.55 – Fator de correção de vazão em função da viscosidade. ....	202
Figura 4.56 – Fator de correção de elevação em função da viscosidade.....	203
Figura 4.57 – Fator de correção de eficiência em função da viscosidade. ....	203
Figura 4.58 – Comparação entre os fatores de correção de elevação no BEP para 1800 rpm. ....	205
Figura 4.59 – Comparação entre os fatores de correção de vazão no BEP para 1800 rpm....	206
Figura 4.60 – Comparação entre os fatores de correção de elevação no BEP para 3500 rpm. ....	208
Figura 4.61 – Comparação entre os fatores de correção de vazão no BEP para 3500 rpm....	209

Figura 4.62 – Comparação entre os fatores de correção de vazão e elevação experimentais e os previstos por Stepanoff (1949).....	210
Figura 4.63 – Correlação experimental para o fator de correção de elevação no BEP. ....	211
Figura 4.64 – Correlação experimental para o fator de correção de vazão no BEP.....	212
Figura 4.65 – Correlação experimental para o fator de correção de eficiência no BEP.....	212
Figura 4.66 – Fluxograma de correção de desempenho. ....	213
Figura 4.67 – Efeito da pressão de entrada no desempenho bifásico da BCS GN5200, rotação de 2400 rpm e vazão de líquido no BEP. ....	215
Figura 4.68 – Efeito da pressão de entrada no desempenho bifásico da BCS GN5200, rotação de 3000 rpm e vazão de líquido no BEP. ....	215
Figura 4.69 – Efeito da pressão de entrada no desempenho bifásico da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm e vazão de líquido no BEP. ....	216
Figura 4.70 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 0,75.BEP. ....	217
Figura 4.71 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido no BEP.....	217
Figura 4.72 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 1,25.BEP. ....	218
Figura 4.73 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 0,75.BEP. ....	219
Figura 4.74 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido no BEP. ....	220
Figura 4.75 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 1,25.BEP. ....	221
Figura 4.76 – Efeito da vazão de líquido no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e rotação de 2400 rpm.....	222
Figura 4.77 – Efeito da vazão de líquido no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e rotação de 3000 rpm.....	222
Figura 4.78 – Efeito da vazão de líquido no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e rotação de 3500 rpm.....	223
Figura 4.79 – Influência da inclinação no desempenho da BCS GN5200, rotação de 2400 rpm. ....	224
Figura 4.80 – Influência da inclinação no desempenho da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm. ....	225

Figura 4.81 – Influência da inclinação no ganho de pressão por estágio, na rotação de 3500, pressão de sucção de 600 kPa e vazão do BEP. ....	226
Figura 4.82 – Influência da inclinação no ganho de pressão por estágio, na rotação de 3500, pressão de sucção de 600 kPa e vazão do 1,25.BEP. ....	227
Figura 4.83 – Visualização do escoamento para a operação horizontal da BCS a 3500 rpm, vazão do BEP, pressão de sucção de 600 kPa e fração de gás de 3,7%. ....	228
Figura 4.84 – Visualização do escoamento para a operação vertical da BCS a 3500 rpm, vazão do BEP, pressão de sucção de 600 kPa e fração de gás de 3,7%. ....	228
Figura 4.85 – Efeito da viscosidade no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e inclinação horizontal. ....	229
Figura 4.86 – Efeito da viscosidade no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e inclinação horizontal. ....	230
Figura 4.87 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na pressão de sucção de 600 kPa, viscosidade de 76 cP e vazão de 0,8.BEP. ....	231
Figura 4.88 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na pressão de sucção de 600 kPa, 76 cP e vazão do BEP. ....	231
Figura 4.89 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na pressão de sucção de 600 kPa, 76 cP e vazão de 1,2.BEP.....	232
Figura 4.90 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 0,8.BEP e viscosidade de 76 cP. ....	233
Figura 4.91 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de BEP e viscosidade de 76 cP. ....	233
Figura 4.92 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 1,2.BEP e viscosidade de 76 cP. ....	234
Figura 5.1 – Recirculações provocadas pela rotação do impelidor (Gulich, 2008).....	236
Figura 5.2 – Perdas por recirculação para (a) vazões menores que o BEP e (b) vazões maiores que BEP (Gulich, 2008). ....	237
Figura 5.3 – Ajuste das constantes do modelo para a elevação na operação monofásica com água.....	247
Figura 5.4 – Comparação entre os coeficientes de elevação calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica com água.....	247
Figura 5.5 – Ajuste das constantes do modelo para a potência na operação monofásica com água.....	248

Figura 5.6 – Comparação entre os coeficientes de potência calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica com água.....	249
Figura 5.7 – Comparação entre os coeficientes de elevação calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica viscosa. ....	250
Figura 5.8 – Comparação entre os coeficientes de potência calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica viscosa. ....	251
Figura 5.9 – Comparação entre a elevação medida experimentalmente e a calculada pelo modelo ajustado, rotação de 3500 rpm e viscosidades de 33, 251 e 600 cP. ....	252
Figura 5.10 – Comparação entre a potência medida experimentalmente e a calculada pelo modelo ajustado, rotação de 3500 rpm e viscosidades de 33, 251 e 600 cP .....	253

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características geométricas do impelidor da BCS P23 .....	94
Tabela 3.2 – Equipamentos utilizados na Montagem Experimental A. ....	99
Tabela 3.3 – Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados Montagem Experimental A. .....	101
Tabela 3.4 – Instrumentação utilizada na Montagem Experimental A. ....	102
Tabela 3.5 – Propriedades das soluções de água/isopropanol na temperatura de 10°C. ....	109
Tabela 3.6 – Ponto de melhor eficiência e limites operacionais com água, nas rotações de 900, 1200 e 1500 rpm. ....	114
Tabela 3.7 – Matriz de testes bifásico com mistura água/glicerina-ar, $\omega = 900 \text{ rpm}$ , $P1 =$ $150 \text{ kPa}$ . ....	115
Tabela 4.1 – Equipamentos utilizados na Montagem Experimental B. ....	161
Tabela 4.2 – Características geométricas do impelidor (Ofuchi, 2015). ....	163
Tabela 4.3 – Características geométricas do estator (Ofuchi, 2015). ....	164
Tabela 4.4 – Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados Montagem Experimental B. .....	166
Tabela 4.5 – Instrumentação utilizada na Montagem Experimental B. ....	167
Tabela 4.6 – Matriz de testes monofásicos viscosos. ....	176
Tabela 4.7 – Pontos de melhor eficiência e limites operacionais com água, BCS GN5200. .	176
Tabela 4.8 – Matriz de testes bifásicos água-ar. ....	177
Tabela 4.9 – Pontos de melhor eficiência e limites operacionais com fluido viscoso, BCS GN5200. ....	178
Tabela 4.10 – Matriz de testes bifásicos água-ar. ....	178
Tabela 4.11 – Fatores de correção de elevação em função da viscosidade para 1800 rpm. ....	204
Tabela 4.12 – Fatores de correção de vazão em função da viscosidade para 1800 rpm. ....	206
Tabela 4.13 – Fatores de correção de elevação em função da viscosidade para 3500 rpm. ....	207
Tabela 4.14 – Fatores de correção de vazão em função da viscosidade para 3500 rpm. ....	209
Tabela 5.1 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica com água. ....	246
Tabela 5.2 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica viscosa. ....	248
Tabela 5.3 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica viscosa. ....	250
Tabela 5.4 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica viscosa. ....	251

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Abreviações

BCS	Bombeio Centrífugo Submerso ou Bomba Centrífuga Submersa
BEP	<i>Best Efficiency Point</i>
BHP	<i>Brake Horsepower</i>
HI	<i>Hydraulic Institute</i>
MLt	<i>Mass Length Time</i>
TUALP	<i>Tulsa University Artificial Lift Projects</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas

$\bar{V}_e$	Velocidade média na entrada da bomba	m/s
$\bar{V}_s$	Velocidade média na saída da bomba	m/s
$\dot{m}_G$	Vazão mássica de gás	kg/s
$\dot{m}_L$	Vazão mássica de líquido	kg/s
$\dot{m}_M$	Vazão mássica de mistura gás-líquido	kg/s
$h_{atrito}$	Dissipação de energia por atrito	m
$h_{choque}$	Dissipação de energia por choque	m
$h_{difusor}$	Dissipação de energia no difusor	m
$h_{disco}$	Dissipação de energia por atrito de disco	m
$h_e$	Entalpia específica na entrada da bomba	J/kg
$h_{recirculação}$	Dissipação de energia por recirculação	m
$h_s$	Entalpia específica na saída da bomba	J/kg
$A_G$	Área transversal ao escoamento ocupada pelo gás	m <sup>2</sup>
$A_L$	Área transversal ao escoamento ocupada pelo líquido	m <sup>2</sup>
$A_t$	Área da seção transversal ao escoamento	m <sup>2</sup>
$C_0$	Parâmetro de distribuição	-
$C_D$	Coeficiente de Arrasto	-
$C_{H,bep}$	Coeficiente de correção viscoso para elevação no BEP	-
$C_H$	Coeficiente de correção viscoso para elevação	-
$C_{q,bep}$	Coeficiente de correção viscoso para vazão no BEP	-
$C_q$	Coeficiente de correção viscoso para vazão	-
$C_{\eta,bep}$	Coeficiente de correção viscoso para eficiência no BEP	-
$C_\eta$	Coeficiente de correção viscoso para eficiência	-
$D_T$	Diâmetro do duto	m
$F_{r\omega}$	Número de Froud centrífugo	-
$H_L$	Altura de elevação de líquido	m
$H_M$	Altura de elevação de mistura gás-líquido	m
$H_{bep}$	Altura de elevação no BEP	m
$H_{teórico}$	Elevação prevista pela equação de Euler	m

$H_{vis,bep}$	Altura de elevação de fluido viscoso no BEP	m
$H_{vis}$	Altura de elevação de fluido viscoso	m
$H_{w,bep}$	Altura de elevação de água no BEP	m
$H_w$	Altura de elevação de água	m
$I_s$	Indicador de <i>Surging</i>	-
$J_G$	Velocidade de deslizamento superficial do gás	m/s
$J_L$	Velocidade de deslizamento superficial do líquido	m/s
$N_s$	Velocidade específica dimensional	
$P_{h,G}$	Potência hidráulica fornecida ao gás	Watts
$P_{h,G}^{ad}$	Potência hidráulica fornecida ao gás na compressão adiabático	Watts
$P_{h,G}^{isot}$	Potência hidráulica fornecida ao gás na compressão isotérmica	Watts
$P_{h,L}$	Potência hidráulica fornecida ao líquido	Watts
$P_h$	Potência hidráulica	Watt
$P_i$	Pressão na entrada do estágio i	Pa
$T_e$	Temperatura na entrada da bomba	K
$T_{eixo}$	Torque de eixo	N.m
$T_i$	Temperatura na entrada do estágio i	K
$V_{DG}$	Velocidade de deslizamento do gás	m/s
$V_{DL}$	Velocidade de deslizamento do líquido	m/s
$V_G$	Velocidade média do gás	m/s
$V_L$	Velocidade média do líquido	m/s
$V_M$	Velocidade da mistura gás-líquido	m/s
$V_{SG}$	Velocidade superficial do gás	m/s
$V_{SL}$	Velocidade superficial do líquido	m/s
$V_{SLIP}$	Velocidade de escorregamento	m/s
$V_{n1}$	Velocidade normal na aresta de entrada do impelidor	m/s
$V_{n2}$	Velocidade normal na aresta de saída do impelidor	m/s
$V_{t1}$	Velocidade tangencial na aresta de entrada do impelidor	m/s
$V_{t2}$	Velocidade tangencial na aresta de saída do impelidor	m/s
$b_2$	Espessura do impelidor na aresta de saída	m
$f_k$	Propriedade genérica da fase k	-
$\dot{m}$	Vazão mássica	Kg/s

$n_s$	Velocidade específica dimensional	
$q_G$	Vazão volumétrica de gás	m <sup>3</sup> /s
$q_L$	Vazão volumétrica de líquido	m <sup>3</sup> /s
$q_M$	Vazão volumétrica de mistura gás-líquido	m <sup>3</sup> /s
$q_{bep}$	Vazão volumétrica no BEP	m <sup>3</sup> /s
$q_{vis,bep}$	Vazão volumétrica de fluido viscoso no BEP	m <sup>3</sup> /s
$q_{vis}$	Vazão volumétrica de fluido viscoso	m <sup>3</sup> /s
$q_{w,bep}$	Vazão volumétrica de água no BEP	m <sup>3</sup> /s
$q_w$	Vazão volumétrica de água	m <sup>3</sup> /s
$r_1$	Raio da aresta de entrada do impelidor	m
$r_2$	Raio da aresta de saída do impelidor	m
$u_1$	Velocidade absoluta do impelidor na aresta de entrada	m/s
$u_2$	Velocidade absoluta do impelidor na aresta de saída	m/s
$w_1$	Velocidade relativa na aresta de entrada do impelidor	m/s
$w_2$	Velocidade relativa na aresta de saída do impelidor	m/s
$z_e$	Cota da entrada da bomba	m
$z_s$	Cota da saída da bomba	m
$D$	Diâmetro característico do impelidor	m
$H$	Altura de elevação	M
$P$	Pressão	Pa
$R$	Constante do gás	J/kgK
$Re_{evdokia}$	Número de Reynolds de Evdokia	-
$Re_{mod}$	Número de Reynolds modificado	-
$Re_{stepanoff}$	Número de Reynolds de Stepanoff	rpm.ft <sup>1/2</sup>
$Re_{\omega}$	Número de Reynolds rotacional	-
$T$	Temperatura	K
$V$	Vetor velocidade absoluta	m/s
$g$	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$k$	Razão entre os calores específicos a pressão e vazão constantes	-
$q$	Vazão volumétrica	m <sup>3</sup> /s
$u$	Vetor velocidade absoluta do impelidor	m/s
$v$	Volume específico	m <sup>3</sup> /kg
$w$	Vetor velocidade relativa	m/s

## Letras Gregas

$\rho$	Massa específica	kg/m <sup>3</sup>
$\omega$	Rotação	rad/s
$\eta$	Eficiência	-
$\epsilon$	Rugosidade	m
$\mu$	Viscosidade dinâmica	Pa.s
$\Psi$	Coeficiente de elevação	-
$\Phi$	Coeficiente de vazão	-
$\Pi$	Coeficiente de potência	-
$X$	Inverso do Número de Reynolds rotacional	-
$\omega_s$	Velocidade específica adimensional	-
$\beta$	Ângulo entre a velocidade relativa e a direção tangencial	graus
$\alpha$	Ângulo entre a velocidade absoluta e a direção tangencial	graus
$\Delta P_{Euler}$	Diferencial de pressão dado pela equação de Euler	Pa
$\rho_L$	Massa específica do líquido	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_G$	Massa específica do gás	kg/m <sup>3</sup>
$\alpha$	Fração de vazio	-
$\alpha_G$	Fração de vazio da fase gás	-
$\alpha_L$	Fração de vazio da fase líquido	-
$\lambda_G$	Frações homogêneas de gás	-
$\lambda_L$	Frações homogêneas de líquido	-
$\psi$	Variável genérica	-
$\alpha_k$	Fração de vazio da fase k	-
$\sigma$	Tensão superficial	N/m
$\eta_M$	Eficiência bifásica da bomba	-
$\rho_M$	Massa específica da mistura gás-líquido	kg/m <sup>3</sup>
$\Delta P_L$	Diferencial de pressão do escoamento monofásico de líquido	Pa
$\Delta P_M$	Diferencial de pressão do escoamento bifásico gás-líquido	Pa
$\Delta P_{M,i}^{stg}$	Diferencial de pressão do escoamento bifásico no estágio i	Pa
$\Delta P_{L,i}^{stg}$	Diferencial de pressão do escoamento monofásico no estágio i	Pa
$\rho_{G,i}$	Massa específica do gás na entrada do estágio i	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda_{G,i}$	Fração homogênea de gás na entrada do estágio i	-

$\nu$	Viscosidade cinemática	m/s <sup>2</sup>
$\phi$	Parâmetro de desempenho de Turpin	-

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	30
1.1	Motivação .....	32
1.2	Objetivos .....	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DE CONCEITOS .....	36
2.1	Conceitos Básicos .....	36
2.1.1	Bomba Centrífugas .....	36
2.1.1.1	Parâmetros Básicos de Desempenho .....	36
2.1.1.2	Adimensionais e Similaridade em Bombas Centrífugas .....	37
2.1.1.3	Equação de Euler para Bombas Centrífugas .....	41
2.1.2	Escoamento Bifásico Gás-Líquido .....	43
2.1.2.1	Modelo de Deslizamento ( <i>Drift-Flux</i> ) .....	46
2.1.3	Desempenho de BCSs Operando com Mistura Bifásica Gás-Líquido .....	48
2.1.3.1	Desempenho de BCS Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido Considerando Modelo Homogêneo .....	49
2.1.3.2	<i>Surging</i> e <i>Gas Locking</i> .....	51
2.2	Revisão Bibliográfica .....	54
2.2.1	Bombas Centrífugas Operando com Escoamento Monofásico Viscoso. ....	54
2.2.2	BCSs Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido .....	68
2.2.3	Visualização de Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Bombas Centrífugas ...	80
3	VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO NO INTERIOR DO IMPELIDOR .....	93
3.1	Protótipo de Visualização .....	93
3.2	Programa Experimental .....	97
3.2.1	Montagem Experimental A .....	97

3.2.2	Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados .....	99
3.2.3	Equipamentos de Visualização .....	103
3.2.3.1	Rotação das Imagens .....	104
3.2.4	Fluidos de Trabalho .....	105
3.2.4.1	Solução Água/Glicerina.....	105
3.2.4.2	Solução Água/Isopropanol .....	108
3.2.5	Procedimentos Experimentais .....	110
3.2.5.1	Testes de Desempenho com Escoamento Monofásico.....	110
3.2.5.2	Testes de Desempenho com Escoamento Bifásico.....	111
3.2.6	Matriz de Testes.....	113
3.3	Resultados Experimentais e Discussões .....	115
3.3.1	Padrões de Escoamento Gás-Líquido no Interior do Impelidor .....	115
3.3.1.1	Distribuição do Tamanho de Bolhas.....	122
3.3.2	Relação Entre Padrão de Escoamento e Desempenho da Bomba Protótipo ....	124
3.3.2.1	Testes de Desempenho com Escoamento Monofásico de Água .....	124
3.3.2.2	Testes de Desempenho com Escoamento Bifásico Água-Ar .....	126
3.3.2.3	Testes de Desempenho com Escoamento Monofásico de Solução Água/Glicerina.....	138
3.3.2.4	Teste de Desempenho com Escoamento Bifásico Água/Glicerina-Ar .....	138
3.3.2.5	Teste de Desempenho com Escoamento Monofásico de Água/Isopropanol.....	149
3.3.2.6	Teste de Desempenho com Escoamento Bifásico Água/Isopropanol-Ar.....	149
4	ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE BCSS.....	158
4.1	Programa Experimental .....	158
4.1.1	Montagem Experimental B.....	158
4.1.2	BCS GN5200.....	162
4.1.3	Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados .....	165
4.1.4	Equipamentos de Visualização .....	168

4.1.5	Fluidos de Trabalho .....	169
4.1.6	Procedimentos Experimentais .....	175
4.1.7	Matriz de Testes.....	175
4.1.7.1	Testes Monofásicos .....	175
4.1.7.1	Testes Bifásicos .....	176
4.2	Resultados Experimentais e Discussões .....	179
	Testes Monofásicos com Água .....	179
4.2.1	Testes Monofásicos com Fluido Viscoso .....	188
4.2.1.1	Aquecimento do Fluido Bombeado .....	199
4.2.1.2	Análise dos Fatores de Correção Viscosos .....	202
4.2.1.3	Metodologia Proposta para o Cálculo dos Fatores de Correção Viscosos ....	211
4.2.2	Testes Bifásicos Água-Ar.....	214
4.2.2.1	Efeito da Pressão de Entrada .....	214
4.2.2.2	Efeito da Rotação da Bomba .....	216
4.2.2.3	Incremento de Pressão por Estágio.....	218
4.2.2.4	Efeito da Vazão de Líquido .....	221
4.2.2.5	Influência da Inclinação.....	223
4.2.3	Testes Bifásico Fluido Viscoso-Ar.....	229
4.2.3.1	Efeito da Viscosidade do Líquido .....	229
4.2.3.2	Efeito da Rotação.....	230
4.2.3.3	Incremento de Pressão por Estágio.....	232
5	MODELAGEM DO ESCOAMENTO.....	235
5.1	Fundamentação Teórica.....	235
5.1.1	Análise do Ganho de Pressão Monofásico .....	235
5.1.2	Análise da Potência de Acionamento Monofásica .....	239
5.1.3	Operação de BCSs com Fluidos de Baixa Viscosidade .....	241
5.1.4	Operação com Mistura Bifásica Gás-Líquido .....	241



5.1.5	Análise do Ganho de Pressão Bifásico .....	243
5.1.6	Análise da Potência Consumida Bifásica .....	244
5.2	Resultados do Modelo .....	246
5.2.1	Escoamento Monofásico de Água .....	246
5.2.2	Escoamento Monofásico Viscoso.....	249
6	CONCLUSÕES.....	255
	REFERÊNCIAS .....	259
	APÊNDICE A - PROTÓTIPO DE VISUALIZAÇÃO.....	264
	APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....	269
	APÊNDICE C - ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS.....	278
	APÊNDICE D - MONTAGEM EXPERIMENTAL B.....	284
	ANEXO I - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	288
	ANEXO II - VÍDEOS.....	404

# 1 INTRODUÇÃO

Os métodos de elevação artificial são frequentes na produção de petróleo. Essas técnicas são empregadas quando o reservatório não possui energia suficiente para elevar os fluidos até a superfície ou em situações em que a vazão produzida naturalmente não é econômica. Os métodos de elevação artificial mais comuns são: Bombeio Mecânico (BM), Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP), *gas lift*, *plunger lift*, Bombeio Hidráulico (BH) e Bombeio Centrífugo Submerso (BCS). A escolha do método de elevação mais adequado para determinado poço é uma decisão que envolve a avaliação das características do reservatório, tais como temperatura, pressão, vazão ótima de produção e propriedades do fluido e as especificações do poço, isto é, profundidade, inclinação, tipo de completação e facilidades de superfície.

Um dos métodos de elevação artificial mais eficiente e flexível é o bombeio centrífugo submerso. Estima-se entre 150 e 200 mil a quantidade de bombas centrífugas em operação em todo mundo, tornando o BCS o segundo método de elevação artificial mais utilizando, depois, apenas, do bombeio mecânico (Flatern, 2015). O sistema de elevação por BCS, Figura 1.1, consiste, basicamente, em motor elétrico, protetor, separador de gás, bomba centrífuga de múltiplos estágios, cabo elétrico e instrumentação.

O acionamento da unidade de bombeamento é feito por meio de um motor elétrico de indução trifásico, que fica submerso no fluido produzido. A energia elétrica necessária ao funcionamento do motor é conduzida por um cabo elétrico da superfície até o fundo do poço. O motor elétrico é conectado à bomba por meio do protetor. Além de suportar o empuxo axial gerado pela bomba, o protetor isola o motor dos fluidos do reservatório, servindo como um reservatório de óleo e equalizando a pressão entre o motor e o poço. Após a sucção da bomba, o separador de gás remove parte do gás livre do fluido produzido e o desvia para o anular do poço. A bomba centrífuga de múltiplos estágios complementa a energia do reservatório, aumentando a pressão do fluido, de modo a superar as perdas de carga até as facilidades de produção. A instrumentação de fundo de poço é composta por sensores de temperatura, pressão, vibração, corrente e voltagem, permitindo o monitoramento das condições operacionais da bomba.

Cada estágio da BCS é composto por um impelidor e um estator. O impelidor é o componente rotativo, enquanto o estator é solidário a carcaça da bomba. O fluido entra no

impelidor na direção axial com velocidade relativamente baixa. Devido à elevada rotação do impelidor, o fluido é acelerado. Assim, o torque aplicado pela bomba ao fluido é convertido em energia cinética. O fluido a alta velocidade deixa o impelidor e entra no estator, onde ocorre a conversão de parte da energia cinética em energia de pressão. Ao deixar o estator, o fluido possui maior pressão quando comparado à entrada do impelidor, portanto, a passagem do fluido pelo estágio aumenta sua pressão. Uma vez que os estágios são montados em série e o processo de ganho de pressão se repete, a pressão do fluido aumenta estágio após estágio. O número de estágios da BCS é função da altura de elevação requerida no sistema de bombeio.

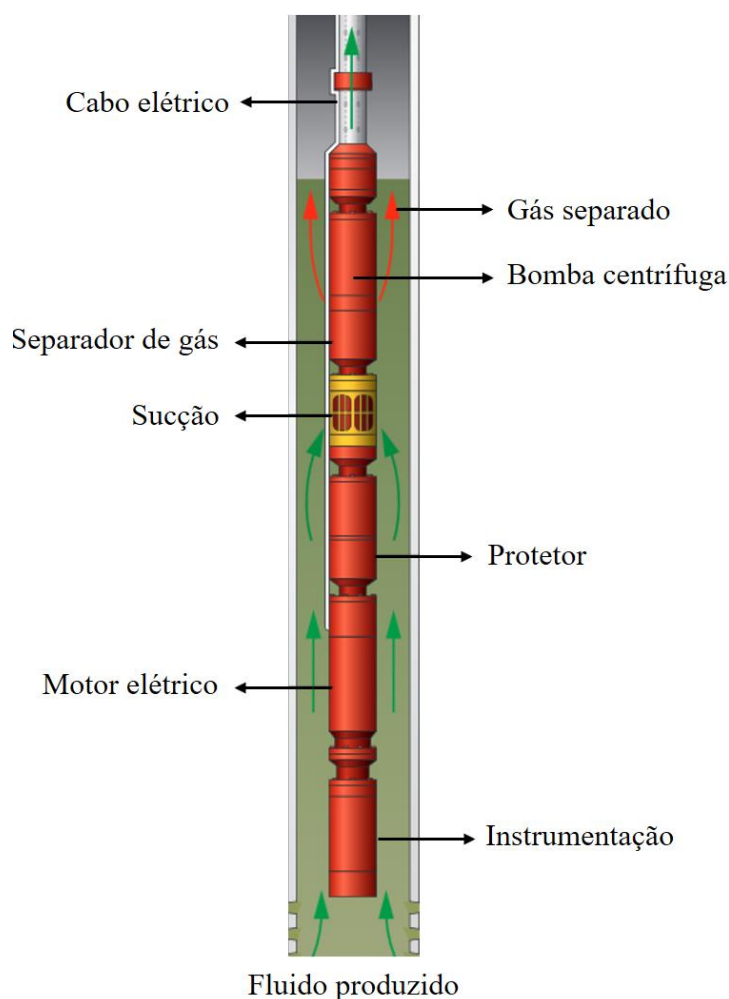


Figura 1.1 – Instalação convencional de BCS (adaptado de Flatern, 2015).

O BCS apresenta vantagens operacionais em relação aos demais métodos de elevação artificial. As bombas centrífugas são caracterizadas pelas elevadas vazões de produção, podendo operar em poços verticais, desviados ou horizontais, em aplicações terrestres ou marítimos.

Entretanto, algumas condições operacionais são desfavoráveis à aplicação de BCSs. Devido à depleção do reservatório, é comum a pressão na sucção da BCS diminuir abaixo da pressão de saturação do petróleo. Nesses níveis de pressão, o fluido produzido é uma mistura bifásica gás-líquido. Para elevadas vazões de líquido e baixas frações de gás, o desempenho da bomba é similar ao escoamento monofásico. Porém, uma degradação severa no desempenho é observada para elevadas frações de gás. A presença de gás livre no escoamento causa instabilidades na curva de ganho de pressão *versus* vazão, podendo até interromper a operação da bomba.

A viscosidade do fluido é outro fator responsável pela degradação do desempenho de bombas centrífugas submersas. As aplicações de BCSs produzindo em campos de petróleo pesado ou com elevadas frações de água, em que podem ocorrer a formação de emulsões, são exemplos da operação com fluidos de elevada viscosidade. As instalações de BCSs na forma de *skids* no leito marinho, também, podem ser problemáticas em relação a viscosidade do óleo. A exposição do petróleo às baixas temperaturas do leito marinho aumenta, consideravelmente, a viscosidade, podendo causar problemas de garantia de escoamento.

## 1.1 Motivação

A operação de BCS com fluidos de elevada viscosidade resulta na degradação de desempenho e, também, no aumento da potência requerida no acionamento da bomba. Alguns procedimentos empíricos estão disponíveis na literatura para prever o desempenho viscoso de bombas centrífugas, partindo-se do conhecimento das curvas de operação com água. As principais referências são: Stepanoff (1949), Gülich (1999 e 2008) e a norma ANSI-HI 9.6.7 (2010) fornecida pelo *Hydraulic Institute*.

Esses trabalhos foram baseados em sua maioria em bombas centrífugas convencionais de voluta, radiais, de grandes diâmetros e simples estágio. No entanto, essas características geométricas diferem das BCSs utilizadas na elevação de petróleo, que possuem geometria radial, mista ou axial, estator, pequenos diâmetros e múltiplos estágios. Devido às grandes diferenças entre as bombas, a aplicação das correlações citadas para a previsão do desempenho de BCSs operando com óleo resulta em erros consideráveis, prejudicando o dimensionamento correto do sistema de produção de campos de petróleo.

Assim, diante do exposto, torna-se evidente a necessidade de novos estudos aplicados a BCSs. Principalmente, estudos experimentais que sirvam como base para

modelagem das perdas viscosas, desenvolvimento de correlações para os fatores de correção e validação de simulações numéricas.

Em relação a operação de BCS na presença de elevadas razões gás-óleo, diversos estudos vêm sendo realizados para investigar o comportamento do escoamento bifásico gás-líquido sujeito a campos centrífugos. Dentre eles, destacam-se os trabalhos de Lea e Bearden (1982), Turpin *et al.* (1986), Sachdeva (1989), Cirilo (1998), Pessoa e Prado (2001), Estevam (2002), Duran (2003), Barrios (2007), Gamboa (2009), Trevisan (2009), Drozdov (2010), Banjar *et al.* (2013), Paternost (2013) e Biazussi (2014).

Por se tratar de um escoamento bifásico, com transferência de massa, em uma geometria não trivial, sujeito a um intenso campo centrífugo, a modelagem do escoamento torna-se complexa, justificando-se, assim, a abordagem empírica adotada na maioria dos trabalhos. Os diversos estudos realizados até agora têm sido fundamentais para compreender o comportamento e fornecer informações sobre o desempenho de BCS operando com misturas gás-líquido. No entanto, são verificados diversos aspectos que ainda precisam ser melhor explorados.

A identificação do arranjo topológico entre as fases no interior do impelidor é fundamental para compreender fisicamente a degradação de desempenho da bomba. Porém, a relação entre os padrões de escoamento e as propriedades dos fluidos ainda é pouco explorada. Os testes experimentais de desempenho são, na sua maioria, realizados com a mistura água-ar. No entanto, as propriedades da mistura água-ar são bastante distintas da mistura óleo-gás natural. A viscosidade da fase líquida e a tensão superficial líquido/gás são duas propriedades que distinguem essas misturas. O efeito da viscosidade no escoamento bifásico gás-líquido em BCSs foi explorado, apenas, por Banjar *et al.* (2013), que ainda assim, considerou viscosidade máxima de 8,5 cP. Os efeitos da tensão superficial foram explorados, apenas, por Drozdov (2010) e Gamboa (2011).

Não há na literatura nenhum estudo que relacione o desempenho bifásico da BCS com a inclinação da instalação. Embora o campo gravitacional seja inferior ao campo centrífugo, o arranjo entre as fases na sucção da bomba pode ser alterado pela inclinação, afetando, assim, o desempenho do sistema de bombeio. Estudos abordando esse tema são de grande interesse para aplicações em campo.

Em termos de modelagem do escoamento bifásico em BCSs, a abordagem por meio de correlações empíricas, ainda é a mais usual. Alguns trabalhos, tais como Estevam (2002),

Gamboa (2011) e Biazussi (2014) adotam modelos mais consistentes com base fenomenológica. O trabalho de Biazussi (2014), baseado no modelo de deslizamento, revelou bons resultados para fluidos de baixa viscosidades. Uma extensão do modelo levando em consideração os efeitos viscosos seria um considerável avanço no esforço de obter um modelo que represente a operação da bomba em condições mais realísticas.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos desse trabalho consistem em:

- Identificar experimentalmente os padrões de escoamento gás-líquido no interior do impelidor de BCSs, assim como verificar a relação entre o arranjo das fases e o desempenho da bomba;
- Investigar experimentalmente a degradação do desempenho de BCS operando com escoamento monofásico de fluido viscoso;
- Estudar experimentalmente a degradação do desempenho de BCSs operando simultaneamente com fluido viscoso e gás livre;
- Estudar os efeitos da inclinação da instalação no desempenho de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido;
- Avançar na modelagem de desempenho de BCS operando com escoamento gás-líquido, incluindo os efeitos viscosos;

Para atingir esses objetivos, foram realizados:

- Desenvolvimento e construção de um aparato experimental, chamado Montagem Experimental A, e de uma bomba protótipo que possibilitasse a visualização do escoamento no interior do impelidor de BCSs;
- Realização de uma matriz de testes experimentais que permitissem investigar a influência da viscosidade e tensão superficial no padrão de escoamento no interior do impelidor e, conseqüentemente, no desempenho bifásico da bomba;
- Desenvolvimento e construção de um aparato experimental, chamado Montagem Experimental B, que permitisse a operação de BCSs convencionais com fluidos de elevada viscosidade e diferentes inclinações;

- Realização de uma matriz de testes experimental para investigar a degradação de desempenho de BCSs operando com fluido viscoso, em escoamento monofásico e bifásico;
- Extensão do modelo de previsão desempenho de BCSs proposto Biazussi (2014), incluindo os efeitos viscosos;

A organização dos próximos capítulos da tese é descrita a seguir.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão da bibliografia e dos conceitos fundamentais necessários para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 3, são apresentados os resultados experimentais da visualização do escoamento bifásico gás-líquido no interior do impelidor de uma BCS. No Capítulo 4, é apresentado um estudo experimental sobre diferentes aspectos que influenciam o desempenho de BCSs. No Capítulo 5, é apresentado o modelo elaborado por Biazussi (2014) e realizada uma proposta de extensão, considerando-se os efeitos viscosos. Finalmente, no Capítulo 6, são realizadas as considerações finais, em que são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DE CONCEITOS

Este capítulo é dividido em duas seções. Primeiramente, são apresentados os conceitos básicos, teorias e definições sobre bombas centrífugas e escoamento bifásico. Na segunda seção, é apresentada uma ampla revisão bibliográfica sobre bombas centrífugas, abordando seu desempenho monofásico viscoso, bifásico gás-líquido e visualização do escoamento bifásico gás-líquido no interior de impelidores de bombas de BCS.

### 2.1 Conceitos Básicos

Nesta seção são introduzidos conceitos básicos e definições que são fundamentais para a compreensão do presente trabalho. Inicialmente, são apresentados os fundamentos sobre bombas centrífugas e, em seguida, é definida a terminologia adotada para escoamentos bifásicos gás-líquido. Na sequência, são apresentadas algumas considerações sobre bombas centrífugas operando com mistura gás-líquido.

#### 2.1.1 Bomba Centrífugas

##### 2.1.1.1 Parâmetros Básicos de Desempenho

A energia transferida ao fluido pela bomba pode ser calculada por meio do balanço de energia aplicado em um volume de controle adequado. Considerando-se escoamento adiabático em regime permanente, tem-se:

$$P_h = \dot{m} \left[ (h_s - h_e) + \frac{(\bar{V}_s^2 - \bar{V}_e^2)}{2} + g(z_s - z_e) \right] \quad (2.1)$$

onde  $P_h$  é a potência hidráulica transferida ao fluido,  $\dot{m}$  é vazão mássica de fluido,  $h$  é a entalpia específica,  $V$  é a velocidade média,  $z$  é a cota e  $g$  é a aceleração da gravidade. Os subíndices  $e$  e  $s$  fazem referência a entrada e saída da bomba, respetivamente.

Para escoamentos isotérmicos e fluido incompressível, a Equação (2.1) pode ser reescrita como:

$$P_h = \rho g H q \quad (2.2)$$



sendo:

$$H = \left( \frac{P}{\rho g} + \frac{\bar{V}^2}{2g} + z \right)_{saída} - \left( \frac{P}{\rho g} + \frac{\bar{V}^2}{2g} + z \right)_{entrada} \quad (2.3)$$

onde  $H$  é definido como altura de elevação manométrica da bomba em metros de coluna de fluido e  $P$  é a pressão em Pa.

A potência mecânica, ou *brake horsepower* (BHP), necessária para acionar a bomba é dada por:

$$BHP = \omega T_{eixo} \quad (2.4)$$

onde  $BHP$  é a potência mecânica em Watts,  $\omega$  é a rotação em rad/s e  $T_{eixo}$  é o torque no eixo de acionamento em N.m.

Devido às perdas hidráulicas e mecânica no interior da bomba, a potência efetivamente transferida ao fluido é menor que a potência mecânica consumida no acionamento da bomba. Portanto, a eficiência da bomba é definida como:

$$\eta = \frac{P_h}{BHP} = \frac{\rho g H q}{\omega T_{eixo}} \quad (2.5)$$

### 2.1.1.2 Adimensionais e Similaridade em Bombas Centrifugas

Para uma determinada bomba centrífuga, os parâmetros de desempenho de altura de elevação  $H$  e de potência mecânica  $BHP$  são função da vazão  $q$ , diâmetro característico do impelidor  $D$ , rotação  $\omega$ , massa específica  $\rho$ , viscosidade  $\mu$  e rugosidade superficial  $\epsilon$ . Portanto, podemos escrever as seguintes relações funcionais:

$$gH = f_1(q, D, \omega, \rho, \mu, \epsilon) \quad (2.6)$$

$$BHP = f_2(q, D, \omega, \rho, \mu, \epsilon) \quad (2.7)$$

Para cada uma dessas funções, existem sete variáveis e três dimensões primárias (sistema MLt). A aplicação direta do teorema dos Pis de Buckingham resulta em quatro grupos adimensionais. A forma adimensional dessas funções é dada por:

$$\frac{gH}{\omega^2 D^2} = g_1 \left( \frac{q}{\omega D^2}, \frac{\rho \omega D^2}{\mu}, \frac{\epsilon}{D} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{BHP}{\rho \omega^3 D^5} = g_2 \left( \frac{q}{\omega D^2}, \frac{\rho \omega D^2}{\mu}, \frac{\epsilon}{D} \right) \quad (2.9)$$

Os termos  $\rho \omega D^2 / \mu$  e  $\epsilon / D$  representam o número de Reynolds rotacional  $Re_\omega$  e a rugosidade relativa, respectivamente. Os outros adimensionais são definidos como:

- Coeficiente de elevação ( $\Psi$ ):

$$\Psi = \frac{gH}{\omega^2 D^2} \quad (2.10)$$

- Coeficiente de vazão ( $\Phi$ ):

$$\Phi = \frac{q}{\omega D^3} \quad (2.11)$$

- Coeficiente de potência ( $\Pi$ ):

$$\Pi = \frac{BHP}{\rho \omega^3 D^5} \quad (2.12)$$

Reescrevendo as Equações (2.8) e (2.9), tem-se:

$$\Psi = g_1 \left( \Phi, X, \frac{\epsilon}{D} \right) \quad (2.13)$$

$$\Pi = g_2 \left( \Phi, X, \frac{\epsilon}{D} \right) \quad (2.14)$$

onde  $X = 1/Re_\omega$  representa o inverso do número de Reynolds rotacional, sendo então, diretamente proporcional a viscosidade do fluido.

Em aplicações com elevado número de Reynolds, verifica-se experimentalmente que  $X$  e  $\epsilon/D$  não possuem efeito significativo sobre o desempenho da bomba. Isso geralmente é válido para operação com fluidos de baixa viscosidade, tal como a água, e rotações suficientemente elevadas ( $\omega > 600 \text{ rpm}$ ). Nessas condições, as Equações (2.13) e (2.14) se reduzem a:

$$\Psi \approx \Psi(\Phi) \quad (2.15)$$

$$\Pi \approx \Pi(\Phi) \quad (2.16)$$

A eficiência já é um adimensional e está relacionada diretamente aos coeficientes de vazão, elevação e potência, tal que:

$$\eta = \frac{\Psi\Phi}{\Pi} \quad (2.17)$$

A velocidade específica  $\omega_s$  é outro parâmetro adimensional importante no estudo de bombas centrífugas. Essa variável é definida no ponto de melhor eficiência e é útil na seleção e especificação dos equipamentos. Para auxiliar essa seleção, demanda-se um adimensional envolvendo rotação, vazão e elevação, mas não diâmetro. Isto é conseguido eliminando-se o diâmetro na razão entre os coeficientes de vazão e elevação, conforme Equação (2.18). Fisicamente, a velocidade específica por ser interpretada como sendo a rotação necessária para produzir uma altura de elevação unitária a uma vazão volumétrica unitária no BEP.

$$\omega_s = \frac{\Phi^{1/2}}{\Psi^{3/4}} = \frac{\omega q_{bep}^{1/2}}{(gH_{bep})^{3/4}} \quad (2.18)$$

onde  $\omega$  é a rotação em rad/s,  $q_{bep}$  é a vazão volumétrica no BEP em m<sup>3</sup>/s,  $H_{bep}$  é a altura de elevação no BEP em m,  $g$  é a aceleração da gravidade em m<sup>2</sup>/s.

A velocidade específica é um parâmetro característico da geometria do impelidor. Impelidores radiais possuem valores baixos de velocidade específica, enquanto impelidores axiais possuem elevados valores de velocidade específica. Os impelidores de fluxo misto apresentam velocidade específica intermediária entre impelidores radiais e axiais.

Embora a velocidade específica seja um parâmetro adimensional, uma variedade de outras definições dimensionais pode ser encontrada na literatura, tais como  $n_s$  e  $N_s$  definidas a seguir.

$$n_s = \frac{\omega q_{bep}^{1/2}}{H_{bep}^{3/4}} \quad (2.19)$$

onde  $\omega$  é a rotação em rpm,  $q_{bep}$  é a vazão volumétrica no BEP em m<sup>3</sup>/s e  $H_{bep}$  é a altura de elevação no BEP em m.

$$N_s = \frac{\omega q_{bep}^{1/2}}{H_{bep}^{3/4}} \quad (2.20)$$

onde  $\omega$  é a rotação em rpm,  $q_{bep}$  é a vazão volumétrica no BEP em gpm e  $H_{bep}$  é a altura de elevação no BEP em ft.

A velocidade específica  $n_s$  é comum no sistema europeu, enquanto  $N_s$  é a unidade habitual americana e também na indústria de petróleo. Para facilitar o entendimento do trabalho, a Equação (2.21) mostra a relação entre as três diferentes definições da velocidade específica.

$$\omega_s = \frac{n_s}{52,9} = \frac{N_s}{2729,6} \quad (2.21)$$

Os coeficientes adimensionais formam a base para a análise de similaridade em bombas centrífugas. Em aplicações onde os efeitos viscosos são desprezíveis, o coeficiente de vazão é tratado como parâmetro independente e os coeficientes de elevação e potência como parâmetros dependentes, conforme mostrados nas Equações (2.15) e (2.16). Com essa hipótese, somada as considerações de bombas e campos de escoamento semelhantes, a semelhança dinâmica é obtida quando o coeficiente de vazão é mantido constante, isto é:

$$\Phi_1 = \Phi_2 \quad ; \quad \left( \frac{q}{\omega D^3} \right)_1 = \left( \frac{q}{\omega D^3} \right)_2 \quad (2.22)$$

Como os adimensionais de elevação e potência dependem apenas do coeficiente de vazão, tem-se:

$$\Psi_1 = \Psi_2 \quad ; \quad \left( \frac{gH}{\omega^2 D^2} \right)_1 = \left( \frac{gH}{\omega^2 D^2} \right)_2 \quad (2.23)$$

$$\Pi_1 = \Pi_2 \quad ; \quad \left( \frac{BHP}{\rho \omega^3 D^5} \right)_1 = \left( \frac{BHP}{\rho \omega^3 D^5} \right)_2 \quad (2.24)$$

As Equações (2.22) a (2.24) são úteis para o projeto de testes com modelos e para transporte de resultados por escala.

### 2.1.1.3 Equação de Euler para Bombas Centrífugas

No desenvolvimento da Equação Fundamental ou Equação de Euler para bombas centrífugas, são consideradas algumas idealizações para o escoamento do fluido através do impelidor.

A primeira hipótese adotada é que não há qualquer tipo de perda no processo de transferência de energia do impelidor para o fluido, sejam elas perdas hidráulicas, volumétricas ou mecânicas. Assim, tem-se que toda potência de eixo do impelidor é, efetivamente, transferida ao fluido. Isto é:

$$P_h = \omega T_{eixo} \quad (2.25)$$

A segunda hipótese adotada considera que o impelidor da bomba possui um número infinito de pás, que possuem espessura desprezível. Essa consideração permite adotar que o escoamento relativo do fluido, sendo unidimensional, é determinado pela curvatura das pás. Portanto, o vetor velocidade relativa do fluido é sempre tangente a pá do impelidor.

Aplicando-se a equação da quantidade de movimento angular a um volume de controle adequado, considerando escoamento unidimensional em regime permanente, o torque exercido pelo escoamento no volume de controle é dado por:

$$T_{eixo} = \rho q (r_2 V_{t2} - r_1 V_{t1}) \quad (2.26)$$

onde  $r_2$  é o raio da aresta de saída,  $r_1$  é o raio da aresta de entrada,  $V_{t2}$  e  $V_{t1}$  são as velocidades tangenciais do fluido na aresta de saída e entrada, respectivamente.

A velocidade absoluta do fluido  $V$  pode ser obtida da soma vetorial das velocidades relativa do fluido  $w$  e absoluta do impelidor  $u$ . A representação vetorial dessas velocidades, nas arestas de entrada e saída do impelidor, são mostradas na Figura 2.1. Também estão indicados nesta figura algumas dimensões características do impelidor. O ângulo  $\beta$  é aquele formado entre a velocidade relativa e a direção tangencial, medido em sentido oposto a rotação do impelidor, e  $\alpha$  é o ângulo entre a velocidade absoluta e a direção tangencial. A composição vetorial dessas velocidades forma os triângulos de velocidade do escoamento na entrada e saída do impelidor.

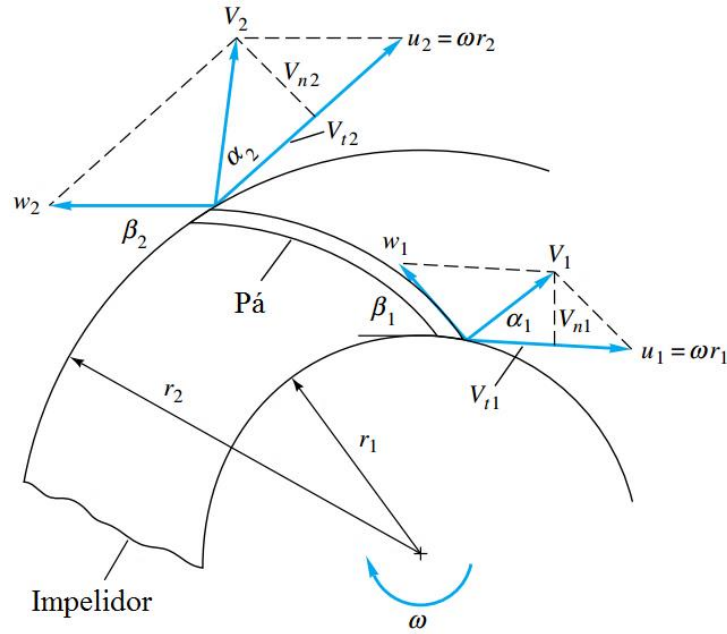


Figura 2.1 – Representação dos triângulos de velocidades no impelidor (adaptado de White, 2011).

Substituindo a Equação (2.26) na Equação (2.25), tem-se:

$$P_h = \omega T_{eixo} = \rho q (u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}) \quad (2.27)$$

Desprezando as variações de energia cinética e potencial, a Equação (2.27) pode ser reescrita como:

$$\Delta P_{Euler} = \rho (u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}) \quad (2.28)$$

onde  $\Delta P_{Euler}$  é o ganho de pressão fornecido ao fluido pelo impelidor.

Considerando-se que o fluido entre no impelidor com velocidade absoluta puramente radial, ou seja,  $\alpha_1 = 90^\circ$ , tem-se que  $V_{t1} = 0$  e a Equação (2.28) pode ser expressa por:

$$\Delta P_{Euler} = \rho \omega^2 r_2^2 \left( 1 - \frac{q \cotg \beta_2}{2\pi b_2 \omega r_2^2} \right) \quad (2.29)$$

onde  $\beta_2$  é o ângulo de saída da pá do impelidor e  $b_2$  é espessura do canal na saída do impelidor.

A Equação (2.29) representa o incremento de pressão idealizado que pode ser fornecido ao fluido pelo impelidor. Essa equação não representa os processos reais de escoamento de fluidos, em que o incremento de pressão é menor do que o ideal. Para que essa

equação represente de forma mais adequada o processo real, correções devem ser implementadas, com base na eliminação das idealizações assumidas no processo da formulação original.

### 2.1.2 Escoamento Bifásico Gás-Líquido

Neste trabalho serão adotados os conceitos de escoamento multifásico em tubos para o estudo de bombas centrífugas operando com mistura gás-líquido. A terminologia que será adotada é baseada naquela proposta por Shoham (2006) e Rosa (2012). As variáveis de interesse do escoamento bifásico gás-líquido são estabelecidas por parâmetros dimensionais e adimensionais, muitos dos quais serão utilizados no decorrer deste trabalho e cujas definições são apresentadas a seguir. Os subscritos  $L$  e  $G$  representam a fase líquido e gás, respectivamente. Todas as variáveis são expressas em Sistema Internacional de unidades.

A vazão mássica da mistura gás-líquido  $\dot{m}_M$  é definida como a soma da vazão mássica das fases, assim:

$$\dot{m}_M = \dot{m}_L + \dot{m}_G \quad (2.30)$$

onde  $\dot{m}_L$  e  $\dot{m}_G$  são as vazões mássicas do líquido e do gás, respectivamente.

A vazão volumétrica da mistura  $q_M$  é definida como:

$$q_M = q_L + q_G \quad (2.31)$$

Sendo que:

$$q_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L} \quad ; \quad q_G = \frac{\dot{m}_G}{\rho_G} \quad (2.32)$$

onde  $q_L$  e  $q_G$  são as vazões volumétricas do líquido e do gás, respectivamente; e  $\rho_L$  e  $\rho_G$  são as massas específicas do líquido e do gás, respectivamente. No caso do estudo de bombas centrífugas, as massas específicas das fases são calculadas nas condições de temperatura e pressão da sucção.

As velocidades superficiais do líquido  $V_{SL}$  e do gás  $V_{SG}$  são definidas como sendo a vazão volumétrica da fase dividida pela área da seção transversal do tubo, conforme Equação (2.33). Fisicamente,  $V_{SL}$  e  $V_{SG}$  representam a velocidade média que cada fase teria se escoasse sozinha na tubulação.

$$V_{SL} = \frac{q_L}{A_t} \quad ; \quad V_{SG} = \frac{q_G}{A_t} \quad (2.33)$$

onde  $A_t$  é a área da seção transversal ao escoamento.

A velocidade da mistura  $V_M$  é dada pela soma das velocidades superficiais de cada fase, assim:

$$V_M = V_{SL} + V_{SG} \quad (2.34)$$

A fração de vazio  $\alpha$  é uma propriedade estatística do escoamento, medida localmente e que representa a probabilidade de existência de uma dada fase em um certo ponto no campo de escoamento. Em abordagens unidimensionais, a fração de vazio do gás  $\alpha_G$  é definida como a razão entre a área transversal ocupada pelo gás e a área da seção transversal ao escoamento.

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A_t} = 1 - \frac{A_L}{A_t} \quad (2.35)$$

onde  $A_G$  é a área ocupada pelo gás e  $A_L$  é a área remanescente ocupada pelo líquido.

De forma análoga para o líquido, tem-se  $\alpha_L$ :

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A_t} \quad (2.36)$$

A soma das frações de cada fase, ou a soma da probabilidade de ocorrência das fases deve ser unitária, portanto:

$$\alpha_G + \alpha_L = 1 \quad (2.37)$$

A velocidade média local de cada fase é definida por:

$$V_L = \frac{q_L}{A_L} \quad ; \quad V_G = \frac{q_G}{A_G} \quad (2.38)$$

Essas velocidades, também, podem ser escritas em função das velocidades superficiais e fração de vazio, assim:

$$V_L = \frac{V_{SL}}{\alpha_L} \quad ; \quad V_G = \frac{V_{SG}}{\alpha_G} \quad (2.39)$$



Essas são as velocidades médias reais das fases líquido e gás, que são maiores que as velocidades superficiais.

Para escoamentos bifásicos em tubos verticais ou inclinados ascendentes, a fase menos densa e/ou menos viscosa tende a escoar com maior velocidade. Em escoamentos gás-líquido, o gás escoa mais rápido que o líquido exceto em escoamentos descendentes. A diferença entre as velocidades locais das fases resulta no escorregamento de uma fase em relação a outra (Govier e Aziz, 1972). A velocidade de escorregamento  $V_{SLIP}$  (*slip velocity*) entre as fases é dada por:

$$V_{SLIP} = V_G - V_L \quad (2.40)$$

Alguns escoamentos bifásicos apresentam um arranjo topológico coerente com os princípios de uma mistura homogênea. Esses escoamentos são chamados de homogêneos, e idealmente, não apresentam escorregamento entre as fases. Portanto, a velocidade da fase líquida é igual à velocidade da fase gasosa. De modo geral, essa condição é válida para o escoamento de pequenas bolhas dispersas carregadas por uma fase líquida contínua que ocorre comumente em escoamentos com elevadas vazões de líquido.

Para escoamentos homogêneos podemos reescrever as Equações (2.35) e (2.36), considerando  $V_G = V_L$ . Isto é:

$$\begin{aligned} \alpha_G &= \frac{A_G}{A_t} = \frac{A_G V_G}{(A_G + A_L) V_G} = \frac{q_G}{q_G + q_L} = \lambda_G \\ \alpha_L &= \frac{A_L}{A_t} = \frac{A_L V_L}{(A_G + A_L) V_L} = \frac{q_L}{q_G + q_L} = \lambda_L \end{aligned} \quad (2.41)$$

onde  $\lambda_G$  e  $\lambda_L$  são conhecidas como frações homogêneas de gás e líquido, respectivamente.

A velocidade de deslizamento (*drift velocity*) das fases é definida como sendo a velocidade relativa a um referencial que se move com a velocidade do centro de volume da mistura. O termo deslizamento significa a magnitude do desvio da velocidade da fase em relação a velocidade da mistura  $V_M$ . Assim:

$$V_{DL} = V_L - V_M \quad ; \quad V_{DG} = V_G - V_M \quad (2.42)$$

onde  $V_{DL}$  e  $V_{DG}$  representam as velocidades de deslizamento das fases líquido e gás, respectivamente.

A velocidade de deslizamento superficial das fases (*drift flux*), ou velocidade de difusão da mistura, é outro importante parâmetro em escoamentos bifásicos que tem origem na diferença de velocidade entre as fases. As velocidades de deslizamento superficiais para o líquido e o gás são definidas por:

$$J_L = \alpha_L(V_L - V_M) \quad ; \quad J_G = \alpha_G(V_G - V_M) \quad (2.43)$$

onde  $J_L$  e  $J_G$  representam as velocidades de deslizamento superficial das fases líquido e gás, respectivamente.

### 2.1.2.1 Modelo de Deslizamento (*Drift-Flux*)

O modelo de deslizamento ou *Drift-Flux Model* foi proposto originalmente por Zuber e Findlay (1965). Esse modelo cinemático considera o deslizamento e a não uniformidade de distribuição das fases na seção transversal da tubulação. A formulação do modelo de deslizamento parte da representação local das variáveis do escoamento, seguido do processo de média. O valor médio de uma variável  $\psi$  na área da seção transversal  $A$  do tubo é definido por (Rosa, 2012):

$$\langle \psi \rangle = \frac{1}{A} \int_A \psi \, dA \quad (2.44)$$

onde  $\langle \psi \rangle$  representa a média da variável  $\psi$  na área transversal do tubo.

Outra definição fundamental para o desenvolvimento do modelo de deslizamento é o processo de média ponderada pela concentração da fase na seção transversal. A média da propriedade  $f$  da fase  $k$  ponderada pela fração de vazio  $\alpha_k$  desta fase, representada por  $\langle f_k \rangle^\alpha$ , é definida por:

$$\langle f_k \rangle^\alpha = \frac{\frac{1}{A} \int_A \alpha_k f_k \, dA}{\frac{1}{A} \int_A \alpha_k \, dA} \quad (2.45)$$

Aplicando a definição de média a Equação (2.45), tem-se:

$$\langle f_k \rangle^\alpha = \frac{\langle \alpha_k f_k \rangle}{\langle \alpha_k \rangle} \quad (2.46)$$

O processo de média pode ser aplicado em ambos lados da Equação (2.42), resultando na velocidade de deslizamento média ponderada pela fração da fase  $k$ . Considerando-se a fase gás, tem-se:

$$\langle V_{DG} \rangle^\alpha = \langle V_G \rangle^\alpha - \langle V_M \rangle^\alpha \quad (2.47)$$

onde  $\langle V_{DG} \rangle^\alpha$  é a velocidade de deslizamento média ponderada do gás,  $\langle V_G \rangle^\alpha$  é a velocidade média ponderada do gás e  $\langle V_M \rangle^\alpha$  é a velocidade média ponderada da mistura.

As velocidades médias ponderadas  $\langle V_G \rangle^\alpha$  e  $\langle V_M \rangle^\alpha$  podem ser calculadas aplicando-se a definição da Equação (2.46). Isto é:

$$\langle V_G \rangle^\alpha = \frac{\langle \alpha_G V_G \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} = \frac{\langle V_{SG} \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} \quad (2.48)$$

$$\langle V_M \rangle^\alpha = \frac{\langle \alpha_G V_M \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} \quad (2.49)$$

Substituindo as Equações (2.48) e (2.49) na Equação (2.47), tem-se:

$$\langle V_{DG} \rangle^\alpha = \frac{\langle V_{SG} \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} - \frac{\langle \alpha_G V_M \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} \quad (2.50)$$

Introduzindo o parâmetro de distribuição  $C_0$  chega-se a:

$$\frac{\langle V_{SG} \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} = C_0 \langle V_M \rangle + \langle V_{DG} \rangle^\alpha \quad (2.51)$$

sendo:

$$C_0 = \frac{\langle \alpha_G V_M \rangle}{\langle \alpha_G \rangle \langle V_M \rangle} \quad (2.52)$$

O parâmetro de distribuição  $C_0$  é introduzido devido à Equação (2.50) possuir uma média de um produto. É conveniente expressar essa equação por meio do produto das médias em vez de média de produtos, o que é feito introduzindo o  $C_0$ . O parâmetro de distribuição  $C_0$  depende, exclusivamente, do perfil de  $\alpha_G$  e  $V_M$  na seção transversal.

Zuber e Findlay (1965) verificaram, experimentalmente, que  $C_0$  e  $\langle V_{DG} \rangle^\alpha$  eram constantes para os padrões bolhas e intermitente no escoamento vertical. Para o escoamento em bolhas, tem-se:

$$C_0 = 1,2 - 0,2 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (2.53)$$

$$\langle V_{DG} \rangle^\alpha = 1,53 \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right]^{0,25} \quad (2.54)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\sigma$  é a tensão superficial.

Para o escoamento intermitente vertical  $C_0 = 1,2$  e  $\langle V_{DG} \rangle^\alpha$  é dado por:

$$\langle V_{DG} \rangle^\alpha = 0,35 \left[ \frac{gD_T(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L} \right]^{0,5} \quad (2.55)$$

onde  $D_T$  é o diâmetro da tubulação.

### 2.1.3 Desempenho de BCSs Operando com Mistura Bifásica Gás-Líquido

A energia total transferida a mistura gás-líquido pela bomba pode ser calculada considerando a compressão das fases separadamente. Essa abordagem despreza qualquer variação de energia interfacial da mistura. Dessa forma, a eficiência  $\eta_M$  da bomba operando com a mistura bifásica gás-líquido por ser aproximada por:

$$\eta_M = \frac{P_{h,L} + P_{h,G}}{BHP} \quad (2.56)$$

onde  $P_{h,L}$  é potencia fornecida a fase líquido, dada pela Equação (2.2), e  $P_{h,G}$  é potência fornecida ao gás.

A energia fornecida ao gás no processo de compressão entre a sucção e a descarga da bomba, considerando um processo reversível sem atrito, no qual as variações de energia potencial e cinéticas são desprezíveis, é dado por:

$$P_{h,G} = \int_e^s v dP \quad (2.57)$$

onde  $v$  é o volume específico, e os limites de integração  $e$  e  $s$  representam a entrada e saída da bomba, respectivamente.

O trabalho de compressão do gás depende do processo termodinâmico. Considerando um processo isotérmico, a Equação (2.57) pode ser escrita como:

$$P_{h,G}^{isot} = \dot{m}_g R T \ln \left( \frac{P_s}{P_e} \right) \quad (2.58)$$

onde  $P_{h,G}^{isot}$  é a potência fornecida ao gás no processo de compressão isotérmico,  $\dot{m}_g$  é a vazão mássica do gás,  $R$  é a constante do gás,  $P_e$  é a pressão de entrada,  $P_s$  é a pressão de saída e  $T$  é temperatura absoluta do gás.

Para o processo de compressão isentrópico, a energia fornecida ao gás é:

$$P_{h,G}^{ad} = \dot{m}_g R T_e \left( \frac{k}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{P_s}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2.59)$$

onde  $P_{h,G}^{ad}$  é a potência fornecida ao gás no processo de compressão isentrópico,  $\dot{m}_g$  é a vazão mássica do gás,  $R$  é a constante do gás e  $T_e$  é temperatura absoluta do gás na sucção e  $k$  é razão entre os calores específicos a pressão e vazão constantes.

### 2.1.3.1 Desempenho de BCS Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido Considerando Modelo Homogêneo

A energia cinética transferida ao fluido pela bomba é proporcional ao termo  $\rho V^2$ . Portanto, uma bomba operando a velocidade constante, transfere quantidades diferentes de energia cinética para fluidos de diferentes massas específicas, fornecendo pressão de descarga maior para o fluido de maior densidade. Embora o diferencial de pressão produzido pela bomba seja função da massa específica, verifica-se, experimentalmente, que a altura de elevação  $H$  é constante, considerando as mesmas velocidades e viscosidades.

Uma metodologia simplificada para avaliar o desempenho de bombas centrífugas operando com escoamento bifásico gás-líquido é considerar a mistura como sendo homogênea. Nesse modelo as velocidades do gás e do líquido são iguais. Isso é válido quando a distribuição espacial das fases é tal que, em cada região do campo de escoamento o fluido é composto

proporcionalmente por cada uma das fases. Assim, podemos calcular a massa específica da mistura  $\rho_M$  como uma ponderação da massa específica de cada fase.

$$\rho_M = \rho_G \lambda_G + \rho_L (1 - \lambda_G) \quad (2.60)$$

Desconsiderando os termos cinéticos e gravitacionais, a altura de elevação  $H_L$  fornecida pela bomba operando com escoamento monofásico de líquido e a altura de elevação  $H_M$  fornecida com uma mistura bifásica gás-líquido, são dadas, respectivamente, por:

$$H_L = \frac{\Delta P_L}{\rho_L g} \quad (2.61)$$

$$H_M = \frac{\Delta P_M}{\rho_M g} \quad (2.62)$$

onde  $\Delta P_L$  e  $\Delta P_M$  são os diferenciais de pressão gerado pela bomba operando com escoamento monofásico de líquido e escoamento bifásico gás-líquido, respectivamente.

Considerando velocidade constante e a diferença de viscosidade entre o líquido e a mistura desprezível, temos que as alturas de elevação são iguais. Portanto:

$$\Delta P_M = \Delta P_L \frac{\rho_M}{\rho_L} \quad (2.63)$$

Para o modelo homogêneo, o diferencial de pressão produzido pela bomba operando com mistura gás-líquido pode ser calculado por:

$$\Delta P_M = \Delta P_L \left[ \frac{\rho_G \lambda_G + \rho_L (1 - \lambda_G)}{\rho_L} \right] \quad (2.64)$$

No caso de bombas de múltiplos estágios, torna-se necessário calcular o diferencial de pressão para cada estágio, pois devido ao aumento sucessivo de pressão entre os estágios, ocorrem variações da massa específica do gás e da fração de vazio. Portanto:

$$\Delta P_{M,i}^{stg} = \Delta P_{L,i}^{stg} \left[ \frac{\rho_{G,i} \lambda_{G,i} + \rho_L (1 - \lambda_{G,i})}{\rho_L} \right] \quad (2.65)$$

onde  $\Delta P_{M,i}^{stg}$  é a pressão produzida pelo estágio  $i$  da bomba operando com mistura,  $\Delta P_{L,i}^{stg}$  é a pressão produzida pelo estágio  $i$  da bomba operando com escoamento de líquido e  $\rho_{G,i}$  e  $\lambda_i$  a massa específica do gás e a fração de vazio calculados nas condições de temperatura e pressão da entrada do estágio  $i$ , respectivamente.

Considerando-se o comportamento de gás ideal, a massa específica na entrada do estágio é fornecida pela equação de estado:

$$\rho_{G,i} = \frac{P_i}{R T_i} \quad (2.66)$$

onde  $P_i$  e  $T_i$  são pressão e temperatura na entrada do estágio, respectivamente e  $R$  a constante do ar.

A fração de vazio na entrada do estágio pode ser expressa em função das vazões mássicas:

$$\lambda_i = \frac{q_{G,i}}{q_{G,i} + q_L} = \frac{\frac{\dot{m}_G}{\rho_{G,i}}}{\frac{\dot{m}_G}{\rho_{G,i}} + \frac{\dot{m}_L}{\rho_L}} \quad (2.67)$$

Portanto, a pressão total gerada por uma bomba de  $n$  estágios  $\Delta P_{LG}^{bomba}$  é:

$$\Delta P_M^{bomba} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{L,i}^{stg} \left[ \frac{\rho_{G,i} \lambda_{G,i} + \rho_L (1 - \lambda_{G,i})}{\rho_L} \right] \quad (2.68)$$

onde  $\rho_{G,i}$  e  $\lambda_i$  são dados pelas Equações (2.66) e (2.67), respectivamente.

Considerando-se o modelo homogêneo, sendo a mistura tratada como um pseudofluido com propriedades médias, a eficiência da bomba pode ser calculada como:

$$\eta = \frac{P_h}{BHP} = \frac{\rho_M g H_M q_M}{\omega T_{eixo}} \quad (2.69)$$

### 2.1.3.2 *Surging e Gas Locking*

A operação de bombas centrífugas na presença de uma fase compressível é caracterizada pela redução da capacidade do equipamento de gerar pressão. Isso não ocorre devido somente a redução da massa específica da mistura, mas também devido a dois fenômenos frequentemente relatados na literatura: *Surging* e *Gas Locking*. Apesar de esses termos serem comuns em estudo experimentais de bombas operando com mistura gás-líquido, não existe um consenso sobre as definições e fronteiras desses fenômenos. A seguir, são

descritas as interpretações físicas de *Surging* e *Gas Locking* que serão adotadas no presente trabalho.

O termo *Surging* tem origem na operação de compressores centrífugos. Nesse contexto, o *Surging* representa o ponto de operação na curva de pressão *versus* vazão, em que ocorre a maior pressão de descarga. Diferentemente da pressão teórica máxima que acontece para a condição de vazão zero, o *Surging* ocorre para vazões maiores que zero. Isso ocorre nos compressores devido a pressão no difusor ser maior que a pressão da saída do impelidor, podendo ocorrer fluxo reverso. Nesses casos, são observadas flutuações de pressão e elevados níveis de ruído e vibração na máquina.

A curva de operação pressão *versus* vazão de bombas centrífugas operando com mistura gás-líquido também apresenta um ponto de máximo em uma vazão diferente de zero. Por isso a analogia do fenômeno de *Surging* em compressores e bombas centrífugas.

Conforme mostrado na Figura 2.2, a presença do gás faz com que a curva de desempenho da bomba possua um máximo local e por consequência, deixe de ser uma função monotônica, como normalmente é, quando operando com escoamento monofásico. Assim, ocorre uma instabilidade operacional devido a não unicidade da solução do sistema formado pelas equações que representam a curva de desempenho da bomba e a curva de carga da tubulação.

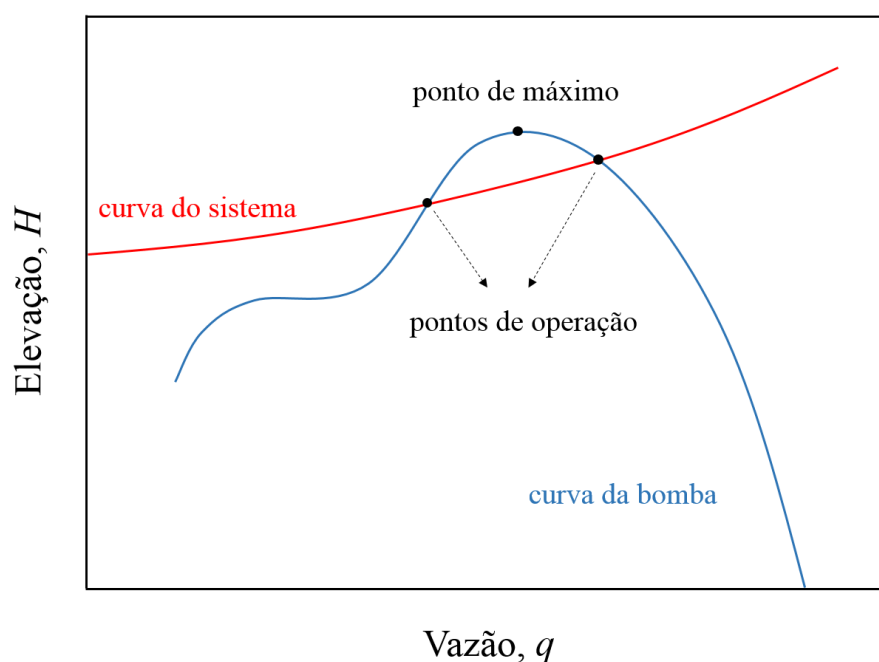


Figura 2.2 – Operação instável de bombas centrífugas operando com mistura bifásica gás-líquido.



Se a curva de carga do sistema possui formato tal que, intercepte a curva da bomba em um único ponto, o sistema de bombeio será estável mesmo que a curva bomba apresente o ponto de *Surging*. Portanto, podemos dizer que o *Surging* é o aparecimento de um ponto de máximo na curva pressão *versus* vazão, que pode resultar em instabilidades operacionais dependendo da curva de carga do sistema.

Em condições operacionais em torno ao ponto de *Surging* é comum que sejam observadas flutuações nos sinais de monitoramento do desempenho da bomba. A Figura 2.3 mostra o registro da pressão de saída em função do tempo indicando as flutuações cíclicas devido a presença do gás. Este processo cíclico gera ondas de pressão que pode ser transmitida de volta ao longo da bomba e a pressão de entrada, também começa a flutuar. Em aplicações de BCSs em poços de petróleo essas oscilações são verificadas através das cartas amperimétricas que registam a corrente de alimentação do motor que aciona a bomba.

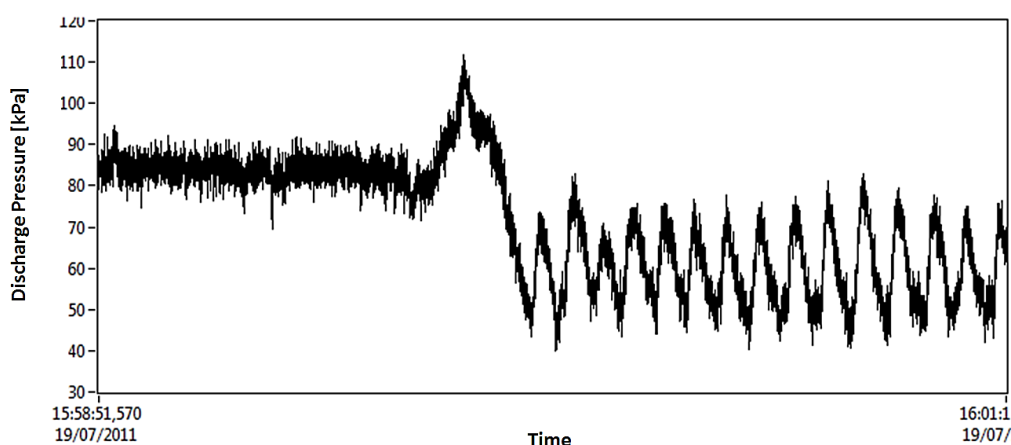


Figura 2.3 – Flutuações na pressão de saída devido à presença de gás (Monte Verde *et al.*, 2013).

O *Gas Locking* é outro importante conceito quando bombas centrífugas operam na presença de gás livre. Nessa condição operacional a degradação do desempenho é tão severa que a bomba perde praticamente toda capacidade de gerar pressão. Assim, a bomba continua girando, consumindo potência, porém é incapaz de transferir energia ao fluido. Se o diferencial de pressão externo não for suficiente para manter o escoamento, o *Gas Locking* resulta em uma vazão nula do sistema. Quando o diferencial de pressão externo é suficiente para manter o escoamento, ocorre a diminuição da vazão e a bomba passa a representar um elemento de perda de carga no sistema.

Em condições operacionais em que BCSs sofrem *Gas Locking*, é necessário aumentar a pressão de sucção para desbloquear a bomba, ou até mesmo parar o sistema de bombeio permitindo que o gás escoe até a superfície devido ao empuxo.

## 2.2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica apresentada nesta seção é dividida em três partes. A primeira delas faz referência aos estudos sobre a operação de bombas centrífugas com escoamento monofásico viscoso. A segunda parte é dedicada aos trabalhos sobre bombas de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido. A última parte apresenta a revisão da literatura que abrange estudos experimentais sobre a visualização do escoamento bifásico no interior de BCSs.

### 2.2.1 Bombas Centrífugas Operando com Escoamento Monofásico Viscoso.

Por definição, todo fluido possui viscosidade. No entanto, neste trabalho será utilizado o termo viscoso para mencionar fluidos com viscosidade maior que 1 mPa.s (1 cP). A seguir, são apresentadas as principais referências disponíveis na literatura que abordam o desempenho de bombas centrífugas e BCSs operando com fluido viscoso.

Stepanoff (1949) realizou um amplo estudo experimental para verificar a influência da viscosidade no desempenho de bombas centrífugas. Para abordar o problema, o autor utilizou dezesseis bombas centrífugas convencionais com diâmetro do flange de descarga de ¾” (19 mm) a 8” (200 mm). Os testes foram realizados com água e onze tipos de óleos, com viscosidades variando entre 1 a 2020 cSt (1 a 1900 mPa).

Stepanoff verificou que, para uma rotação  $\omega$  constante, a capacidade de elevação e a vazão da bomba diminuem com o aumento da viscosidade, de tal maneira que a velocidade específica  $N_S$  permanece constante no ponto de melhor eficiência. Assim:

$$N_S = \frac{\omega \sqrt{q_{w,bep}}}{(H_{w,bep})^{3/4}} = \frac{\omega \sqrt{q_{vis,bep}}}{(H_{vis,bep})^{3/4}} \quad (2.70)$$

onde  $N_S$  é a velocidade específica,  $\omega$  é a rotação em rpm,  $q_{w,bep}$  e  $q_{vis,bep}$  são as vazões de água e de fluidos viscoso no BEP em gpm,  $H_{w,bep}$  e  $H_{vis,bep}$  as alturas de elevação de água e fluidos viscoso no BEP em ft.

Para uma rotação constante a Equação (2.70) pode ser reescrita como:

$$\frac{q_{vis,bep}}{q_{w,bep}} = \left( \frac{H_{vis,bep}}{H_{w,bep}} \right)^{1,5} \quad (2.71)$$

Os coeficientes de correção viscosos no BEP, para a vazão  $C_{q,bep}$ , elevação  $C_{H,bep}$  e eficiência  $C_{\eta,bep}$  são definidos, respectivamente, como:

$$C_{q,bep} = \frac{q_{vis,bep}}{q_{w,bep}} \quad (2.72)$$

$$C_{H,bep} = \frac{H_{vis,bep}}{H_{w,bep}} \quad (2.73)$$

$$C_{\eta,bep} = \frac{\eta_{vis,bep}}{\eta_{w,bep}} \quad (2.74)$$

onde  $\eta_{w,bep}$  e  $\eta_{vis,bep}$  são as eficiências máximas na operação com água e fluido viscoso, respectivamente.

Reescrevendo a Equação (2.71), tem-se:

$$C_{q,bep} = C_{H,bep}^{1,5} \quad (2.75)$$

Portanto, se o desempenho com água é conhecido, é necessário, apenas, um fator de correção para obter-se o desempenho com fluido viscoso.

Baseado nos resultados experimentais, o autor propôs um diagrama, Figura 2.4, para os fatores de correção de elevação e eficiência, válidos para o BEP, em função do número de Reynolds de Stepanoff. O número de Reynolds de Stepanoff é definido pela Equação (2.76).

$$Re_{stepanoff} = \frac{\omega q_{vis}}{\nu \sqrt{H_{w,bep}}} \quad (2.76)$$

onde  $\omega$  é a rotação em rpm,  $q_{visc}$  é a vazão de fluido viscoso em ft<sup>3</sup>/s,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido em ft<sup>2</sup>/s e  $H_{w,bep}$  é a altura de elevação com água em ft.

O número de Reynolds de Stepanoff é função da vazão de fluido viscoso, que é geralmente desconhecida, tornando o procedimento de correção iterativo. Assim, conhecido os dados de desempenho com água no BEP, o procedimento de correção inicia-se com uma

estimativa da vazão de fluido viscoso. Com a vazão estimada, calcula-se o número de Reynolds de Stepanoff através da Equação (2.76) e obtém-se graficamente o fator de correção da vazão através da Figura 2.4. Calcula-se a vazão de fluido viscoso por meio do fator de correção dado pela Equação (2.72) e então esse valor é comparado com a estimativa inicial da vazão. O procedimento é repetido até a convergência. Após a convergência, calcula-se a altura de carga corrigida para o fluido viscoso dado pela Equação (2.75).

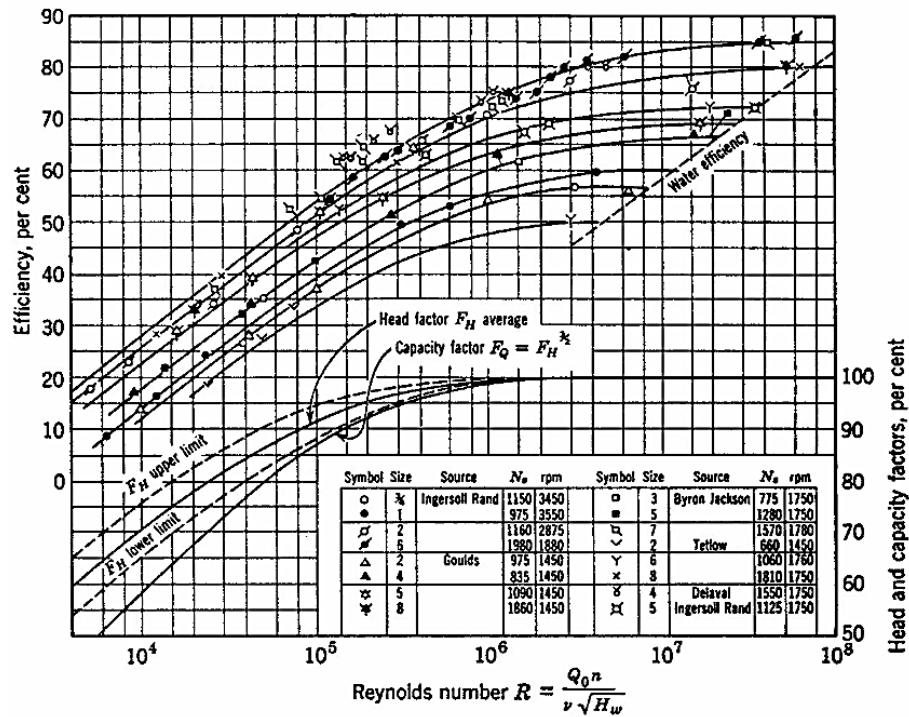


Figura 2.4 – Fatores de correção de elevação e eficiência no ponto do BEP (Stepanoff, 1982).

TUALP (2006, *apud* Solano, 2009) propôs alterações na metodologia de correção de desempenho de Stepanoff (1949), visando tornar o procedimento de cálculo direto. A metodologia modificada baseia-se em um número de Reynolds que é função, apenas, do desempenho da bomba operando com água, o  $Re_{evdokia}$ , definido por:

$$Re_{evdokia} = Re_{stepanoff} \frac{q_{w,bep}}{q_{vis,bep}} \quad (2.77)$$

onde  $Re_{stepanoff}$  é definido pela Equação (2.76), porém em um sistema de unidades diferente.

Substituindo a Equação (2.76) na Equação (2.77), tem-se:

$$Re_{evdokia} = 6,0345 \frac{\omega q_{w,bep}}{\nu \sqrt{H_{w,bep}}} \quad (2.78)$$

onde  $\omega$  é a rotação em rpm,  $q_{w,bep}$  é a vazão de água no BEP em bdp,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido em cSt e  $H_{w,bep}$  é a altura de elevação com água no BEP em ft.

Utilizando o número de Reynolds modificado, os autores reconstruíram o diagrama de Stepanoff (1949) e forneceram uma expressão analítica para o cálculo do coeficiente de correção para a elevação, Equação (2.79).

$$C_{H,bep} = 1 - e^{(-0,033823 Re_{evdokia}^{0,36769})} \quad (2.79)$$

Uma vez que o  $Re_{evdokia}$  é função apenas do desempenho com água, que é geralmente conhecido, o procedimento de correção torna-se direto. Calculado o coeficiente de correção de elevação, o coeficiente de correção para a vazão pode ser calculado conforme definido por Stepanoff, Equação (2.75). O desempenho corrigido para o fluido viscoso é calculado pelas Equações (2.72) e (2.73).

O *Hydraulic Institute-USA* (1955) investigou, experimentalmente, o desempenho de bombas centrífugas convencionais de simples estágio operando com óleos derivados de petróleo. Foram utilizadas bombas centrífugas de 1 a 8" (25 a 200 mm) de diâmetro de flange de descarga, vazões de 3400 a 340000 bpd (540 a 540000 m<sup>3</sup>/h), altura de elevação variando entre 6 a 600 ft (1,8 a 183 m) e viscosidade cinemática entre 4 a 3300 cSt. Com base nesses resultados experimentais foram propostos dois ábacos, um para as bombas de 2 até 8" e outro para bombas de 1" de diâmetro de flange de descarga. Esses ábacos fornecem os fatores de correção de vazão  $C_q$ , altura de elevação  $C_H$  e eficiência  $C_\eta$ , que são utilizados na correção da curva de desempenho da bomba operando com fluido viscoso. Os fatores de correção são definidos como:

$$C_q = \frac{q_{vis}}{q_w} \quad (2.80)$$

$$C_H = \frac{H_{vis}}{H_w} \quad (2.81)$$

$$C_\eta = \frac{\eta_{vis}}{\eta_w} \quad (2.82)$$

onde  $q$  é a vazão,  $H$  é a elevação e  $\eta$  é a eficiência. Os subíndices  $w$  e  $vis$  representam a operação com água e fluido viscoso, respectivamente.

O ábaco proposto para as bombas de 2 até 8" é mostrado na Figura 2.5. Os fatores de correção são obtidos, diretamente, da leitura do ábaco. Para uma determinada vazão de água no BEP ( $q_{w,bep}$ ), eixo das abscissas, é traçada uma linha vertical até a curva correspondente a elevação com água no BEP ( $H_{w,bep}$ ). A partir desse ponto, é traçada uma linha horizontal até a viscosidade que se deseja realizar a correção. Então, é traçada uma nova linha vertical até os fatores de correção.

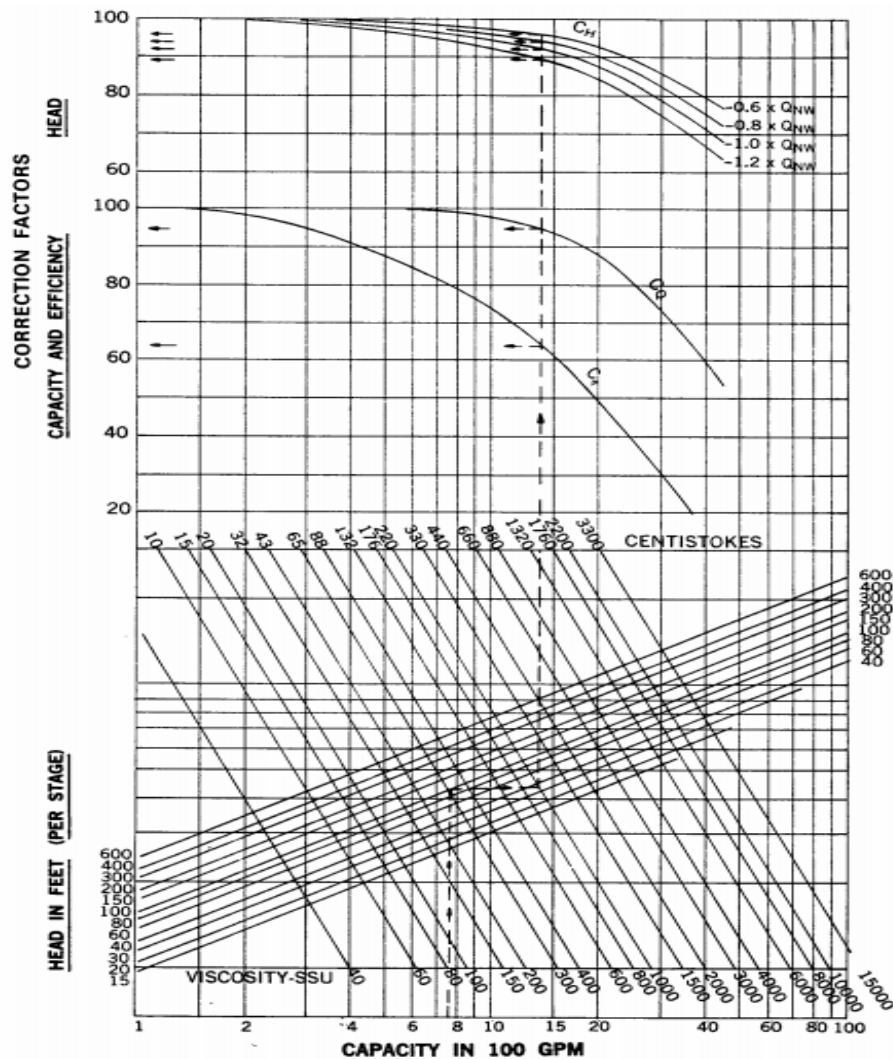


Figura 2.5 – Ábaco para correção de desempenho de bombas centrífugas de 2 a 8" operando com fluido viscoso (Hydraulic Institute, 1983).

Os fatores de correção  $C_q$  e  $C_\eta$  são independentes da vazão de água. No entanto, o fator de correção  $C_H$  varia com a vazão e o ábaco fornece esse fator para quatro vazões diferentes, que são 0,6, 0,8, 1 e 1,2 vezes a vazão do ponto e melhor eficiência.

Diferentemente do procedimento proposto por Stepanoff (1949) que apresenta os fatores de correção, apenas, no BEP, o procedimento do *Hydraulic Institute-USA* (1955) corrige em sua totalidade a curva de desempenho da bomba quando operando com fluido viscoso.

Turzo *et al.* (2000) digitalizou os ábacos do Hydraulic Institute-USA (1955) e por meio da regressão dos dados ajustou equações analíticas para cada curva proposta. Segundo o autor, os fatores de correção são função da vazão de líquido corrigida  $Q^*$ , definida por:

$$Q^* = \exp \left[ \frac{39,5276 + 26,5605 \ln(\nu) - \gamma}{51,6565} \right] \quad (2.83)$$

sendo:

$$\gamma = -7,5946 + 6,6504 \ln(H_{w,bep}) + 12,8429 \ln(q_{w,bep}) \quad (2.84)$$

onde  $q_{w,bep}$  é vazão de água no BEP em  $10^2$ .gpm,  $H_{w,bep}$  é a elevação no BEP em ft e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido viscoso em cSt.

Os fatores de correção para vazão e eficiência são definidos pelas Equações (2.85) e (2.86), sendo válidos para toda curva de desempenho.

$$C_q = 1,0 - 4,0327 \cdot 10^{-3} Q^* - 1,724 \cdot 10^{-4} (Q^*)^2 \quad (2.85)$$

$$C_\eta = 1,0 - 3,3075 \cdot 10^{-2} Q^* - 2,8875 \cdot 10^{-4} (Q^*)^2 \quad (2.86)$$

O fator de correção de elevação é função da vazão. As Equações (2.87) a (2.90) fornecem os fatores de correção para elevação para quatro vazões diferentes, que são 0,6, 0,8, 1 e 1,2 vezes a vazão do ponto e melhor eficiência.

$$C_{H,0,6} = 1,0 - 3,68 \cdot 10^{-3} Q^* - 4,36 \cdot 10^{-5} (Q^*)^2 \quad (2.87)$$

$$C_{H,0,8} = 1,0 - 4,4723 \cdot 10^{-3} Q^* - 4,18 \cdot 10^{-5} (Q^*)^2 \quad (2.88)$$

$$C_{H,1,0} = 1,0 - 7,00763 \cdot 10^{-3} Q^* - 1,41 \cdot 10^{-5} (Q^*)^2 \quad (2.89)$$

$$C_{H,1,2} = 1,0 - 9,01.10^{-3}Q^* - 1,31.10^{-5}(Q^*)^2 \quad (2.90)$$

Uma vez que os fatores de correção são determinados, o desempenho corrigido é calculado pelas Equações (2.80) a (2.82).

Gulich (1999) propôs um modelo semiempírico de correção de desempenho viscoso baseado na análise da dissipação de energia no interior da bomba. O autor afirma que o atrito de disco e as dissipações viscosas, devido ao atrito nos canais do impelidor, são as principais causas da degradação do desempenho da bomba quando operando com fluidos viscosos.

A perda por atrito de disco foi modelada empiricamente, sendo considerado também o efeito térmico. A energia dissipada na forma de calor aquece o fluido entre o impelidor e a carcaça da bomba, reduzindo, localmente, a viscosidade e consequentemente, reduzindo a perda por atrito de disco. Baseado em resultados experimentais, o autor concluiu que, para viscosidades acima de  $4.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , o aquecimento do fluido é considerável devido à dissipação causada pela tensão de cisalhamento. Com base nessas observações, foi proposto um fator empírico que permite estimar o quanto o fator de atrito de disco se reduz devido ao efeito térmico.

As perdas devido ao atrito nos canais da bomba, também, foram modeladas empiricamente. Segundo proposto pelo autor, essa perda é função do fator de atrito, do número de Reynolds e da velocidade específica.

O modelo proposto para a correção de desempenho foi comparado com dados de testes disponíveis na literatura para bombas de voluta, com simples estágio e velocidade específica entre 600 e 2400, com unidades da Equação (2.70). Embora as características geométricas dessas bombas não fossem totalmente conhecidas, o modelo apresentou bons resultados. A principal vantagem do método de correção baseado na análise de perdas, é que a metodologia pode ser aplicada em qualquer tipo de bomba e permite levar em consideração as características específicas da bomba em questão.

Amaral (2007) desenvolveu um trabalho teórico-experimental que teve como objetivo estudar a influência da viscosidade no desempenho de bombas centrífugas. Nesse trabalho, o autor propôs um modelo para previsão de desempenho viscoso e realizou sua validação por meio de dados experimentais.

Para os testes experimentais, foram utilizadas três bombas centrífugas, sendo uma bomba radial de voluta e duas BCSs. As BCSs escolhidas foram os modelos GN700 de 3



estágios ( $q_{w,bep} = 46,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ) e J350N de 2 estágios ( $q_{w,bep} = 82,8 \text{ m}^3/\text{h}$ ), ambas de fluxo misto. A BCS GN7000 teve seu estágio intermediário instrumentado, possibilitando a medição da variação de pressão no estator e no impelidor. Os testes foram realizados com água e glicerina nas viscosidades de 60 cP, 270 cP, 720 cP e 1020 cP, e rotações de 1800 a 3500 rpm.

Partindo-se das equações de conservação de massa e quantidade de movimento, na forma unidimensional, aplicadas aos canais do impelidor, o autor propôs um modelo dito generalista para previsão do desempenho de bombas centrífugas operando com fluidos viscosos. Em relação ao desenvolvimento do modelo, destacam-se dois termos que foram ajustados através dos ensaios experimentais, que são o fator cinemático  $f_c$  e a constante empírica  $k$  referente a geometria da bomba. O fator cinemático refere-se à redução da transferência de quantidade de movimento para o fluido devido aos efeitos bidimensionais do campo de velocidades e, também, do afastamento da velocidade média em relação a velocidade teórica. Esses efeitos são causados por recirculações, obstruções devido as pás na entrada do impelidor, e a ação da força de Coriolis entre outros fatores, sendo modelados empiricamente. Já a constante  $k$  é um fator de escala adimensional que representa a dissipação de energia devido ao choque na entrada da bomba quando a vazão é diferente daquela do BEP.

Os dados experimentais obtidos por Amaral (2007) foram utilizados para ajustar e validar o modelo proposto. Os resultados experimentais obtidos para as BCSs e os obtidos com a aplicação do modelo, foram também comparados com os valores fornecidos pelos ábacos do *Hydraulic Institute-USA* (1955). Os resultados mostraram que para a altura de elevação os desvios não excedem 5%, porém para a vazão chegam a 28% e variam entre -25% a 17% para a eficiência.

Gülich (2008) propôs um modelo empírico para correção do desempenho viscoso baseado em resultados de testes disponível na literatura e em seu modelo de perdas (Gülich, 1999). As Figura 2.6 e Figura 2.7 mostram os fatores de correção de eficiência e elevação para os resultados dos testes experimentais e os previstos pela análise de perdas.

Para investigar a influência do número de Reynolds, do tipo de bomba (sucção simples ou dupla) e da velocidade específica, os fatores de correção foram plotados em relação ao número de Reynolds modificado  $Re_{mod}$ , definido pela Equação (2.91).

$$Re_{mod} = Re \omega_s^{1,5} f_q^{0,75} \quad (2.91)$$

sendo:

$$Re = \frac{\omega r_2^2}{\nu} \quad (2.92)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds,  $\omega_s$  é a velocidade específica adimensional,  $f_q = 1$  para bombas de sucção simples ou  $f_q = 2$  para bombas de sucção dupla,  $\omega$  é a rotação da bomba em rad/s,  $r_2$  é o raio externo do impelidor em m,  $\nu$  é a viscosidade cinemática em  $m^2/s$ ,  $q_{w,bep}$  é a vazão de água no BEP em  $m^3/s$  e  $H_{w,bep}$  é a altura de elevação em m.

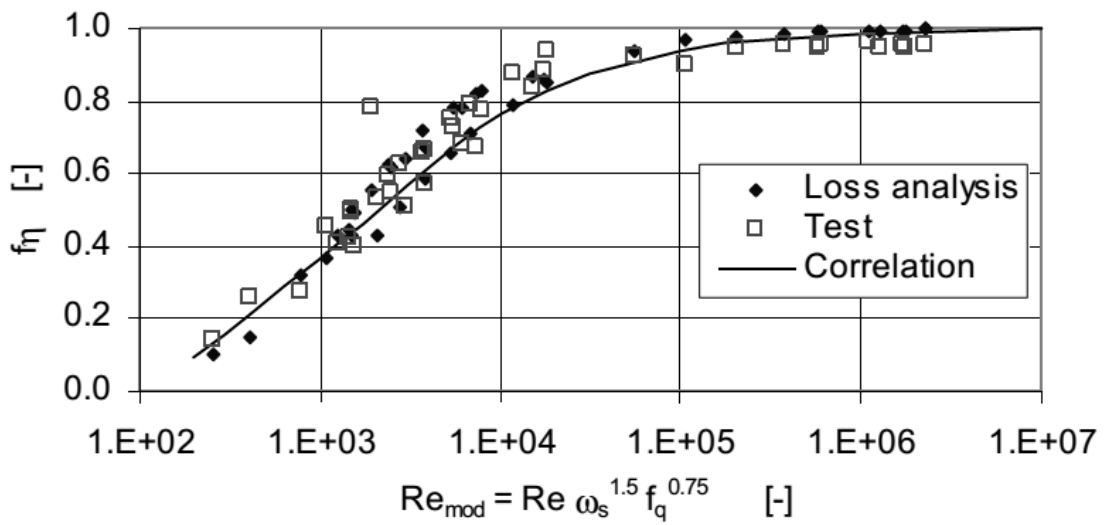


Figura 2.6 – Fator de correção da eficiência, comparação do modelo de perdas e resultados de testes experimentais (Gülich, 2008).

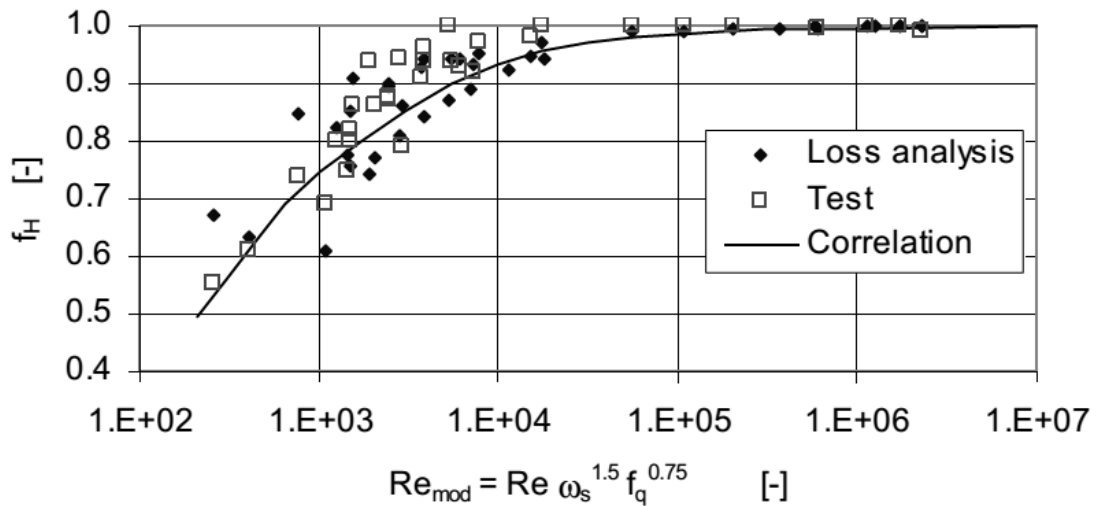


Figura 2.7 – Fator de correção da elevação, comparação do modelo de perdas e resultados de testes experimentais (Gülich, 2008).

Os resultados dos testes mostrados nessas figuras abrangem as seguintes condições operacionais:  $250 < Re_{mod} < 10^7$  ou  $1500 < Re < 10^8$ ;  $0,140 < d_2 < 0,510$  m;  $1 < \nu < 3000 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s;  $310 < N_s < 2300$  em unidades da Equação (2.70).

Baseado nos resultados dos testes experimentais e os previstos pela análise de perdas, o autor propôs correlações para os fatores de correção em função do número de Reynolds modificado. As correlações para o fator de correção de eficiência e elevação no BEP são definidas pelas Equações (2.93) e (2.94), respectivamente.

$$C_\eta = f_\eta = Re_{mod}^{-y} \quad (2.93)$$

$$C_{H,bep} = f_{H,opt} = Re_{mod}^{-x} \quad (2.94)$$

onde:

$$y = \frac{19}{Re_{mod}^{0,705}} \quad (2.95)$$

$$x = \frac{6,7}{Re_{mod}^{0,735}} \quad (2.96)$$

Para a operação em uma vazão fora do BEP, o coeficiente de correção é fornecido por:

$$f_H = C_H = 1 - (1 - f_{H,opt}) \left( \frac{q}{q_{bep}} \right)^{0,75} \quad (2.97)$$

O fator de correção da vazão é igual ao fator de correção de elevação no BEP. Portanto:

$$f_Q = C_Q = f_{H,opt} \quad (2.98)$$

Segundo o autor, essa metodologia de correção é válida para viscosidades até  $4000 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s e velocidade específica entre 360 e 2580, em unidades da Equação (2.70).

A metodologia proposta por Güllich (2008) é bastante simplificada quando comparada com o modelo de perdas apresentado por Güllich (1999). O modelo baseado nas perdas viscosas requer um considerável detalhamento das características geométrico do impelidor da bomba, tais como diâmetros e ângulos de entrada e saída, folgas internas e

rugosidades superficiais. Dessa forma, a previsão de desempenho viscoso baseado na análise de perdas fica limitada aos casos onde a geometria do equipamento é totalmente conhecida. Em casos contrários, em que apenas o desempenho com água é disponível, a previsão do desempenho viscoso pode ser calculada pela metodologia empírica proposta por Gülich (2008), porém com incertezas superiores em relação a abordagem semiempírica da análise de perdas.

Solano (2009) estudou o efeito da viscosidade no desempenho de uma BCS de 7 estágios amplamente utilizada na produção de petróleo. A BCS selecionada para os testes foi o modelo DN1750, que possui vazão de água no BEP de 11,6 m<sup>3</sup>/h. Com base na análise das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia aplicadas ao impelidor da bomba, o autor verificou que o desempenho da bomba pode ser descrito pelos quatro grupos adimensionais tradicionais de turbomáquinas, conforme mostrado na Equação (2.99).

$$\Psi = f(Re, \Phi) = g(Re, \omega_s) \quad (2.99)$$

onde  $\Psi$  é o coeficiente de elevação,  $\Phi$  é o coeficiente de vazão,  $Re$  é o número de Reynolds e  $\omega_s$  é a velocidade específica.

Os resultados experimentais obtidos foram utilizados para estabelecer a relação funcional entre esses adimensionais. Os experimentos foram realizados para três valores diferentes de velocidade específica, sendo uma no BEP e as outras duas nos limites operacionais especificados pelo fabricante. Para cada velocidade específica foram testadas diferentes viscosidades e rotações.

O autor afirma que, para uma determinada velocidade específica, existe uma relação funcional constante entre o coeficiente de vazão e o coeficiente de elevação. Essa relação permanece inalterada independente da rotação e da viscosidade. Esses resultados mostram que o uso da análise dimensional é um procedimento adequado para determinar o desempenho da bomba operando com fluido. Os resultados experimentais, também, validam o procedimento proposto por Stepanoff (1949), inclusive para velocidades específicas diferentes do BEP.

A norma ANSI-HI 9.6.7 (2010) é o procedimento mais recente fornecido pelo *Hydraulic Institute* para correção do desempenho de bombas centrífugas operando com fluido viscoso. A metodologia proposta consiste de um modelo empírico baseado em um extenso banco de dados fornecido por diferentes fabricantes. Esse banco de dados compreende testes de bombas de simples e múltiplos estágios, com impelidores fechados e semiabertos, vazão no

BEP com água de 3 a 410 m<sup>3</sup>/h, elevação por estágio no BEP com água de 6 a 130 m e viscosidade cinemática de 1 a 3000 cSt.

A correção do desempenho viscoso é realizada por meio dos coeficientes  $C_q$ ,  $C_H$  e  $C_\eta$ , definidos nas Equações (2.80) a (2.82). Os coeficientes de correção são função do parâmetro  $B$ , definido por:

$$B = 16,5 \cdot \frac{\nu^{0,50} (H_{w,bep})^{0,0625}}{(q_{w,bep})^{0,375} \omega^{0,25}} \quad (2.100)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática em cSt,  $H_{w,bep}$  é a altura de elevação com água no BEP em metros,  $q_{w,bep}$  é a vazão de água no BEP em m<sup>3</sup>/h e  $\omega$  é a rotação em rpm.

Se  $1,0 < B < 40$ , o coeficiente de correção de vazão  $C_q$ , que é igual ao coeficiente de correção de elevação no BEP  $C_{H,bep}$ , é definido por:

$$C_q = C_{H,bep} = 2,71^{-0,165 \cdot (\log_{10} B)^{3,15}} \quad (2.101)$$

Para o restante da curva, exceto o BEP, o coeficiente de correção de elevação é definido por:

$$C_H = 1 - \left[ (1 - C_{H,bep}) \cdot \left( \frac{q_w}{q_{w,bep}} \right)^{0,75} \right] \quad (2.102)$$

O coeficiente de correção para a eficiência, válido para a toda curva de desempenho, é definido pela Equação (2.103).

$$C_\eta = B^{-(0,0547 \cdot B^{0,69})} \quad (2.103)$$

Caso  $B < 1$ , os fatores de correção são unitários e caso  $B > 40$ , a aplicação está além do escopo do procedimento.

O procedimento de correção proposto pela ANSI-HI 9.6.7 (2010) é recomendado para bombas centrífugas de velocidade específica  $N_s \leq 3000$ , em unidades da Equação (2.70), fluidos Newtonianos e viscosidade cinemática de até 4000 cSt. Esse intervalo de velocidade específica é característico de bombas radiais. Portanto, para a correção do desempenho de BCSs, a norma fica restrita a apenas alguns modelos, pois a maioria das BCSs possuem geometria de fluxo misto e apresentam velocidade específica  $N_s > 3000$ . Além disso, as BCSs

são bombas de múltiplos estágios, possuem difusores e geralmente são limitadas a pequenos diâmetros externos. Essas características geométricas são bastantes distintas das bombas centrífugas utilizadas como referência para a norma, que são bombas de um ou poucos estágios, possuem voluta e diâmetros externos convencionais. Todos esses fatores causam discrepâncias consideráveis entre o desempenho viscoso real e o previsto pela correção, limitando assim, sua aplicação.

Recentemente, os avanços computacionais têm tornado significativos os trabalhos utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para simular o desempenho de bombas centrífugas operando com fluidos viscosos. Autores como Segala (2010), Sirino (2013) e Ofuchi (2015) são exemplos de estudos numéricos do desempenho de bombas centrífugas operando na presença de fluidos viscoso, sendo os trabalhos de Sirino (2013) e Ofuchi (2015) voltados para BCSs utilizadas na indústria de petróleo.

Ofuchi (2015) destaca-se entre esses trabalhos, pois simulou numericamente a BCS GN 5200 de 3 estágios, um dos modelos de bomba estudados experimentalmente no presente trabalho. As equações transientes de conservação de massa e do balanço de quantidade de movimento, que modelam o escoamento nas BCSs, foram resolvidas numericamente utilizando o programa computacional comercial Ansys-CFX. Além da BCS GN5200, o modelo GN7000 também foi estudado numericamente. As simulações foram realizadas para rotações variando entre 1800 a 3500 rpm, viscosidades de 1 até 3580 cSt e vazões desde zero até a vazão máxima em cada condição operacional.

A validação do modelo numérico utilizado por Ofuchi (2015) foi feita utilizando dados experimentais de Amaral (2007) que realizou ensaios experimentais com a BCS GN7000, também de 3 estágios. As simulações feitas para o modelo GN5200 foram comparadas apenas com os dados de catálogo do fabricante, que valem para a operação com água, devido à falta de dados experimentais disponíveis na literatura. Baseado nas simulações numéricas o autor propôs uma metodologia de correção de desempenho similar a proposta por Gülich (2008), Equação (2.94), entretanto com a formulação diferente do número de Reynolds e dos coeficientes.

Vieira (2015) realizou um estudo analítico sobre as dissipações de energia e os efeitos viscosos no desempenho de bombas centrífugas. O trabalho é baseado em uma ampla pesquisa bibliográfica, onde a autora revisa os diversos modelos de perda disponíveis na literatura. As perdas foram divididas como internas e externas ao impelidor. As perdas internas

são classificadas como perdas por atrito  $h_{atrito}$ , perdas por choque  $h_{choque}$  e perdas por recirculação  $h_{recirculação}$ . As perdas externas são as perdas no difusor  $h_{difusor}$  e as perdas de disco  $h_{disco}$ . A altura de elevação fornecida pela bomba centrífuga é obtida pela Equação (2.104).

$$H = H_{teórico} - h_{atrito} - h_{choque} - h_{recirculação} - h_{difusor} - h_{disco} \quad (2.104)$$

onde  $H_{teórico}$  é a elevação prevista pela equação de Euler, considerando o número finito de pás do impelidor, a pré-rotação do fluido e a não uniformidade nos perfis de velocidade.

Como resultado da revisão da literatura, Vieira (2015) obteve seis diferentes modelos para a elevação teórica, sete para a perda por choque, oito para a perda por recirculação, três para a perda no difusor e nove para as perdas de disco. Esses modelos foram implementados numericamente para calcular cada perda separadamente e, também, aplicados a Equação (2.104), resultando em 90720 combinações para o cálculo da elevação fornecida pela bomba. Baseado nessas diversas possibilidades, foi possível determinar qual combinação fornece a parametrização mais precisa em relação aos dados experimentais.

Baseado nos estudos apresentados nesta revisão bibliográfica sobre os efeitos viscosos no desempenho de bombas centrífugas, são feitas as seguintes conclusões:

- A maioria dos trabalhos propõem-se a investigar a influência da viscosidade no desempenho de bombas centrífugas por meio de abordagens empíricas, em que, baseado em resultados de testes experimentais, são propostas correlações para os coeficientes de correção. Embora a incerteza associada a essas correlações seja grande, esses procedimentos são os mais utilizados devido à praticidade e a não necessidade de maiores detalhamentos geométricos.

- As abordagens semiempíricas, baseadas nas dissipações de energia no interior da bomba, representam outra metodologia adotada para estudar os efeitos viscosos. Nessa metodologia os autores têm como base o desempenho teórico com água, dado pela equação de Euler de turbomáquinas. A partir do desempenho invíscido teórico são subtraídas as perdas de energia. A modelagem das diferentes perdas é, em sua maioria, relacionada às características geométricas do equipamento. Esse tipo de abordagem fornece bons resultados desde de que a geometria interna da bomba seja totalmente conhecida.

- Os estudos da degradação do desempenho de bombas operando com fluidos viscosos vêm sendo desenvolvidos desde a década de 1940. Esses trabalhos foram baseados em sua maioria em bombas centrífugas convencionais de voluta, radiais, de grandes diâmetros e

simples estágio. No entanto, essas características geométricas diferem das BCSs utilizadas na elevação de petróleo, que possuem geometria radial, mista ou axial, possuem estator, pequenos diâmetros e múltiplos estágios. Devido às grandes diferenças entre as bombas, a aplicação das correlações citadas para a previsão do desempenho de BCSs operando com óleo, resulta em erros consideráveis, prejudicando o dimensionamento correto do sistema de produção de campos de petróleo.

– Dentre os trabalhos citados nesta revisão bibliográfica, apenas Amaral (2007) e Solano (2009) são voltados, especificamente, para a indústria de petróleo. Assim, diante do exposto, torna-se evidente a necessidade de novos estudos aplicados a BCSs. Principalmente, estudos experimentais que sirvam como base para modelagem das perdas, desenvolvimento de correlações para os fatores de correção e validação de simulações numéricas.

### **2.2.2 BCSs Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido**

Lea e Bearden (1982) realizaram os primeiros estudos sobre bombas centrífugas operando com escoamento bifásico gás-líquido aplicado a indústria do petróleo. Nesse trabalho foram utilizadas as bombas radiais I-42B e C-72 e a bomba de fluxo misto K-70. Essas três BCSs foram testadas com a mistura Diesel e CO<sub>2</sub>, sendo o modelo I-42B também testado com a mistura água-ar. Para os testes realizados com a mistura água-ar, utilizou uma montagem experimental onde a BCS foi instalada submersa dentro de um tubo de Plexiglass. Embora o acionamento da bomba tenha sido realizado utilizando-se um motor externo ao tubo, a montante da BCS foi colocado um motor modelo com as mesmas dimensões usadas em campo, simulando a geometria anular no qual o fluido escoar até a sucção da bomba.

Com essa configuração de montagem, uma fração do gás é bombeado juntamente ao líquido e outra parte fica segregada no topo do anular, necessitando ser drenada para manter a altura dinâmica do líquido constante. Nos testes com a mistura água-ar os autores utilizaram pressão de sucção variando entre 25 e 30 psig (172,4 e 206,8 kPa) e frações homogênea de gás entre 0 e 17%. Nos testes com Diesel e CO<sub>2</sub>, foi utilizado uma montagem experimental similar, no entanto com um circuito fechado para o Diesel e para o CO<sub>2</sub>. A pressão de sucção máxima utilizada foi 400 psig (2758 kPa) e fração homogênea máxima de gás de 50%. Como procedimento experimental os autores adotaram testes a fração volumétrica de gás e pressão de sucção constantes, sendo os resultados apresentados em curvas de altura de elevação *versus* vazão de líquido. A altura de elevação foi calculada considerando a massa específica da mistura



sem escorregamento entre as fases. A Figura 2.8 mostra o desempenho da BCS I42-B operando com a mistura água e ar em diferentes frações volumétricas de gás.

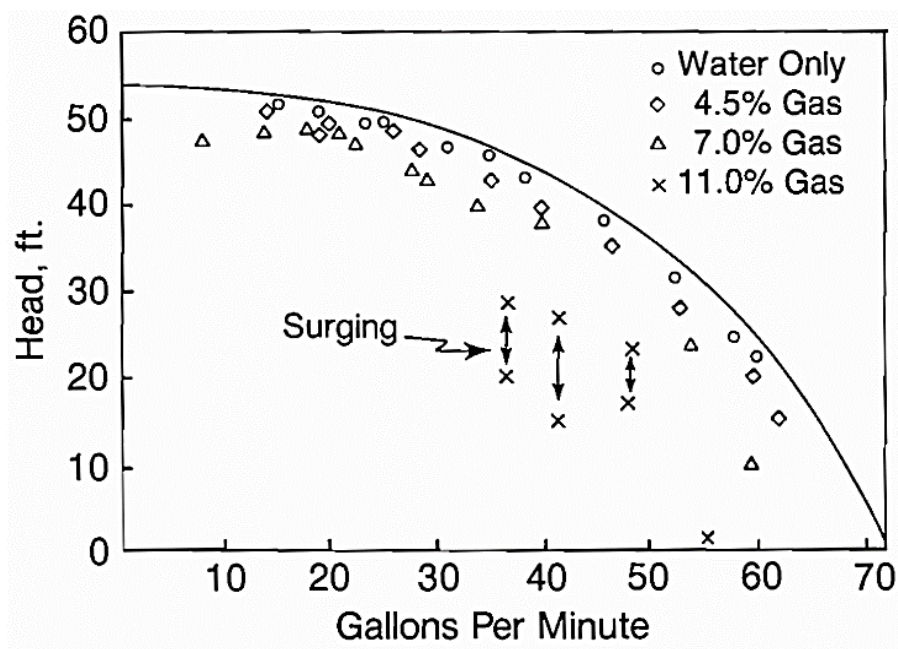


Figura 2.8 – Curva de desempenho da BCS radial I42-B operando com a mistura água-ar (Lea e Bearden, 1982).

Baseado nos resultados experimentais, Lea e Bearden (1982) concluíram que, para uma fração de gás constante, a degradação do desempenho diminui com o aumento da pressão de sucção. Quando a fração de gás atinge um valor crítico o escoamento se torna instável, condição operacional denominada de *Surging* pelos autores. Para os testes com água e ar, esse valor crítico foi de 11% para a pressão de 25 psig (172,4 kPa). Para os testes com Diesel e CO<sub>2</sub>, a fração de gás crítica foi de 15% a pressão de 50 psig (344,7 kPa). Os autores, também, observaram que o desempenho da bomba operando na presença de gás também depende da geometria do impelidor, sendo o impelidor de fluxo misto mais tolerante a presença de gás do que os impelidores radiais. Para os testes em diferentes rotações, verificou-se que as leis de afinidade não se aplicam a bombas centrífugas operando com escoamento bifásico gás-líquido. O estudo realizado pelos autores foi essencialmente experimental, em que nenhuma correlação ou modelo foi apresentada para descrever as observações experimentais.

Turpin *et al.* (1986) utilizaram os resultados experimentais obtidos por Lea e Bearden (1982) e propuseram uma correlação empírica para modelar o desempenho das BCSs testadas. Essa correlação estabelece que o desempenho bifásico da bomba é função da pressão

de sucção, da vazão de líquido e da razão entre a vazão de gás e a vazão de líquido. A correlação proposta para os modelos I-42B e K-70 é dada por:

$$H_M = H_L e^{-a_1(q_G/q_L)} \quad (2.105)$$

onde  $H_M$  é a altura de elevação da mistura gás-líquido em ft, calculada utilizando a massa específica da mistura,  $H_L$  é a altura de elevação operando com água em ft,  $q_G$  a vazão volumétrica de gás em bbl/d,  $q_L$  a vazão volumétrica de líquido em bbl/d e  $a_1$  dado pela Equação (2.106).

$$a_1 = \left( \frac{346430}{P^2} \right) \left( \frac{q_G}{q_L} \right) - \frac{410}{P} \quad (2.106)$$

onde  $P$  é a pressão absoluta na sucção da bomba em psi.

Para a bomba C-72, os autores propuseram uma correlação similar, dada pela Equação (2.107).

$$H_M = H_L e^{-a_2(q_G/q_L)} [1 - 0,0258(q_L - Q_D) + 0,00275(q_L - Q_D)^2 - 10^{-4}(q_L - Q_D)^3] \quad (2.107)$$

onde:

$$a_2 = \left( \frac{285340}{P^2} \right) \left( \frac{q_G}{q_L} \right) \quad (2.108)$$

$$Q_D = 98,3 - 33,3\phi \quad (2.109)$$

sendo o parâmetro  $\phi$  calculado por:

$$\phi = 2000 \left( \frac{q_G/q_L}{3P} \right) \quad (2.110)$$

Nessa correlação a região de desempenho aceitável da bomba coincide com a região de aplicação da correlação. Essa região é identificada pelo parâmetro  $\phi$ . Para  $\phi < 1$ , as correlações são válidas e uma degradação moderada da bomba é observada. Para  $\phi > 1$ , as correlações obtidas não são válidas para descrever o comportamento da bomba operando com gás, porém nessa região o desempenho da bomba possui uma degradação severa, sendo sua aplicação evitada. A utilização do parâmetro  $\phi$  é mostrada na Figura 2.9, que apresenta a

comparação entre os resultados experimentais e a correlação proposta para a bomba I42-B. Para  $\phi=0,60$  e  $0,985$  existe um bom ajuste entre os dados experimentais e a correlação proposta, no entanto para  $\phi=1,62$  e  $3,34$  a correlação fornece resultados incorretos.

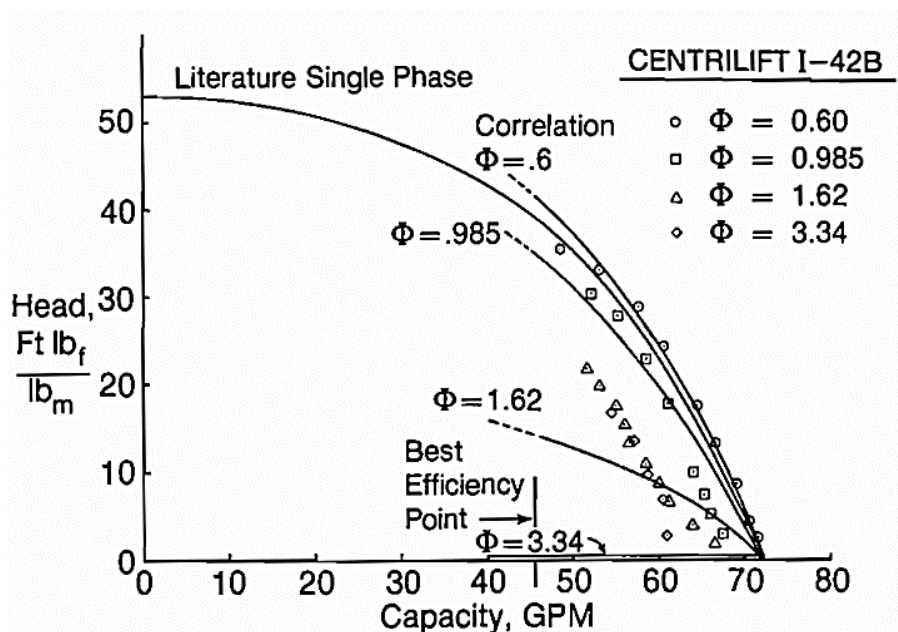


Figura 2.9 – Curva de desempenho da BCS radial I42-B operando com a mistura água-ar (Lea e Bearden, 1982).

Sachdeva (1989) propôs o primeiro modelo semiempírico aplicado à indústria de petróleo para prever os comportamentos de BCS operando com misturas gás-líquido. O modelo desenvolvido é unidimensional e baseado na aplicação das equações de conservação de massa e quantidade de movimento para ambas as fases, acompanhada de uma equação de estado para a fase compressível. Esse modelo mostrou-se capaz de prever tendências observadas na operação de BCS, tais como: aumento da degradação de desempenho com o aumento da fração de gás, diminuição da degradação da bomba devido ao aumento da pressão de sucção e tendência de ocorrência de *Surging* a esquerda do BEP. Embora a modelagem considere a geometria da bomba, o autor relata a dificuldade de se obter os parâmetros geométricos da bomba e relações de fechamento para o modelo. A comparação do modelo proposto por Sachdeva (1989) com os resultados experimentais de Lea e Bearden (1980) apresenta um erro médio da ordem de 40 a 60%.

Cirilo (1998) conduziu um estudo experimental para determinar o desempenho de três modelos de BCS operando com escoamento gás-líquido. Os modelos escolhidos foram as BCSs GN4000, GN7000 e GN2100, sendo as duas primeiras de geometria mista e a última de

geometria radial. Os testes de desempenho foram realizados utilizando a mistura água-ar como fluido de trabalho. Como procedimento experimental o autor realizou testes com frações volumétricas de gás e pressão de sucção constantes. Os resultados foram apresentados como curvas de elevação *versus* vazão total, em que a elevação foi calculada utilizando a massa específica da mistura considerando modelo homogênea e a vazão total a soma das vazões das fases.

Baseado nos resultados experimentais, o autor verificou que a capacidade da bomba de operar na presença de gás livre melhora significativamente com o aumento da pressão de sucção, assim como o efeito do gás é mais pronunciado em baixas vazões de líquido. Comparando o desempenho dos três modelos de BCS em condições operacionais similares, foi verificado que existe uma relação entre a velocidade específica e a capacidade da bomba de operar com gás. Para a BCS GN7000, maior velocidade específica, verificou-se que a degradação do desempenho é menor quando comparada ao modelo GN2100, de menor velocidade específica.

Outra contribuição relevante do trabalho de Cirilo (1998) foi o estudo da influência do número de estágios no desempenho bifásico da bomba. A BCS GN4000 foi testada com 6, 12 e 18 estágios. A Figura 2.10 mostra o desempenho desse modelo em função do número de estágio para fração de gás de 15% e pressão de sucção de 200 psig. Esses resultados indicam que ocorre uma menor degradação do desempenho com o aumento do número de estágios. Isso acontece devido à compressibilidade do gás. Os últimos estágios recebem um gás mais denso, e conseqüentemente, com menor fração de vazio. Portanto, fica evidente a importância da medição do desempenho por estágio, em vez da medição, apenas, das pressões de entrada e saída da bomba.

O autor, também, propôs uma correlação para determinar a fração de gás máxima  $\lambda_G$  para a operação estável de BCSs de fluxo misto. Essa correlação, Equação (2.111), depende, apenas, da pressão de sucção da bomba e é válida para frações de gás maiores que 15%.

$$\lambda_G = 0,0187P_i^{0,4342} \quad (2.111)$$

onde  $P_i$  é a pressão de sucção da bomba em psia.

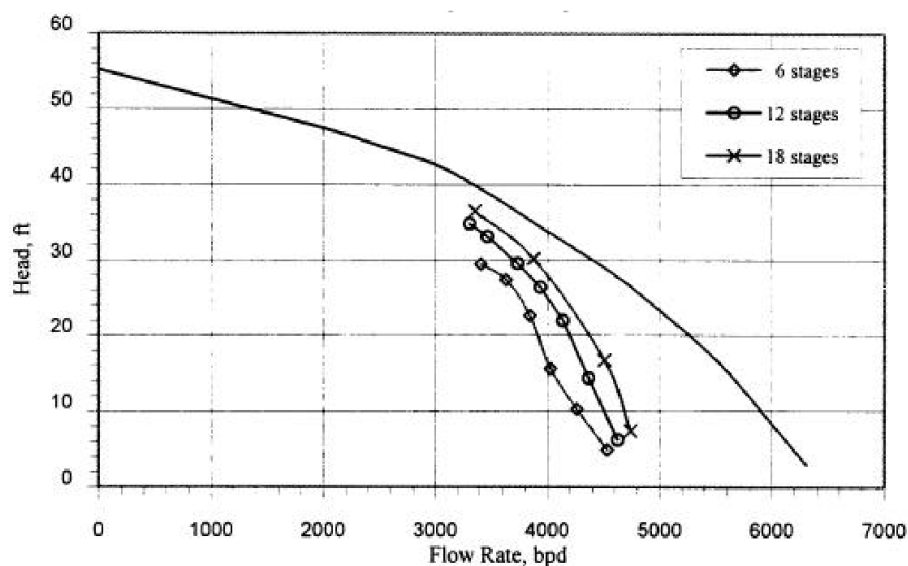


Figura 2.10 – Desempenho da BCS GN4000 para diferentes números de estágios, fração de gás de 15% e pressão de sucção de 200 psig (Cirilo, 1989).

Pessoa e Prado (2001) realizaram um estudo experimental do desempenho de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido. Os autores utilizaram uma BCS de fluxo misto de 22 estágios, instrumentada de forma a medir-se o ganho de pressão de cada estágio separadamente. Os testes foram realizados utilizando a mistura água e ar, rotação de 3200 rpm e pressão de sucção de 100 psig. O procedimento experimental adotado consisti em manter constantes a pressão de sucção e a vazão volumétrica de gás, enquanto varia-se a vazão de líquido do valor máximo ao mínimo.

A Figura 2.11 apresenta alguns resultados do desempenho da bomba medido por estágio. Esses resultados mostram que o desempenho médio da bomba possui uma diferença considerável quando comparado ao desempenho medido por estágio. Em algumas condições de operação, observou-se que o primeiro estágio representava uma queda de pressão, sendo os estágios posteriores responsáveis pelo aumento global de pressão. Baseado nesses resultados, o autor destaca a importância de uma modelagem que considere o número de estágio da BCS ao invés dos modelos usuais que consideram o desempenho médio.

Além da degradação do desempenho da BCS, devido à presença de uma fase compressível, o autor observou os fenômenos de *Surging* e *Gas Locking*. O *Surging* foi definido como uma flutuação cíclica da pressão do sistema, sendo identificado matematicamente como uma região de inclinação positiva na curva de desempenho da bomba. O *Gas Locking* é definido como a região de operação em que seu desempenho é totalmente degradado, tornando a bomba

incapaz de fornecer qualquer energia ao fluido. Outro fenômeno citado por Pessoa e Prado (2001) foi o *Gas Blocking*. Nessas condições de funcionamento, ocorre a diminuição da área disponível ao escoamento dentro do impelidor devido ao acúmulo de gás na região de baixa pressão das pás. Essa bolha de gás estacionária interfere na vazão, pois bloqueia parcialmente a área do impelidor, diminuindo a capacidade da bomba de fornecer energia ao fluido.

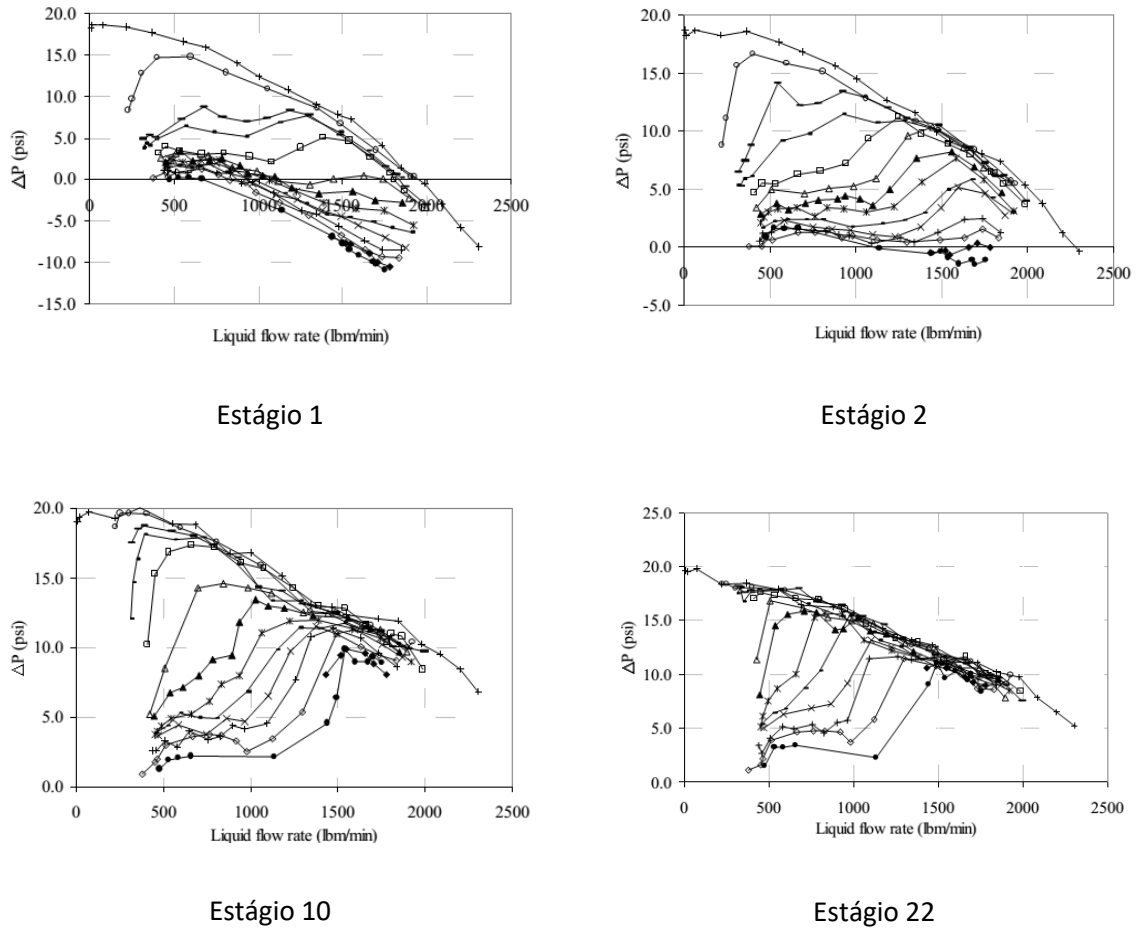


Figura 2.11 – Incremento de pressão por estágio para BCS operando com mistura bifásica água-ar (Pessoa e Prado, 2001)

Estevam (2002) estudou experimentalmente e modelou o escoamento bifásico em BCSs. Baseado nas observações experimentais o autor propôs um mapa de desempenho que é função da fração volumétrica de gás e do adimensional chamado Indicador de *Surging*  $I_s$ , definido por:

$$I_{ss} = C_D \left( \frac{\bar{r}}{d_b} \right) F_{r\omega} \quad (2.112)$$

onde  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $\bar{r}$  é o raio médio do impelidor,  $d_b$  é o diâmetro de bolha e  $F_{r\omega}$  é o número de Froude centrífugo.

Esse número adimensional, obtido a partir da aplicação do modelo de dois fluidos, relaciona a força de arrasto e a força centrífuga com a fração de vazio na entrada do impelidor. A aplicação do indicador de *Surging* indica qual o padrão de escoamento ocorre nos canais do impelidor: bolhas dispersas na entrada ou em todo o canal do impelidor; ou estratificado com região de remistura formada por bolhas dispersas. A ocorrência do *Surging* é relacionada com a estratificação do escoamento no interior do impelidor. Um maior detalhamento sobre os padrões de escoamento observados por Estevam (2002) é apresentado na próxima seção da revisão bibliográfica, dedicada a estudos sobre visualização de escoamento gás-líquido em impelidores de bombas centrífugas.

A Figura 2.12 apresenta o mapa de padrões em função do Indicador de *Surging*. Se o  $I_s$  é maior que um certo limite, significa que a força de arrasto supera a força devido ao campo centrífugo. Assim, as bolhas escoam para fora do impelidor. Esse caso indica a região de Bolhas Dispersas no mapa de padrões.

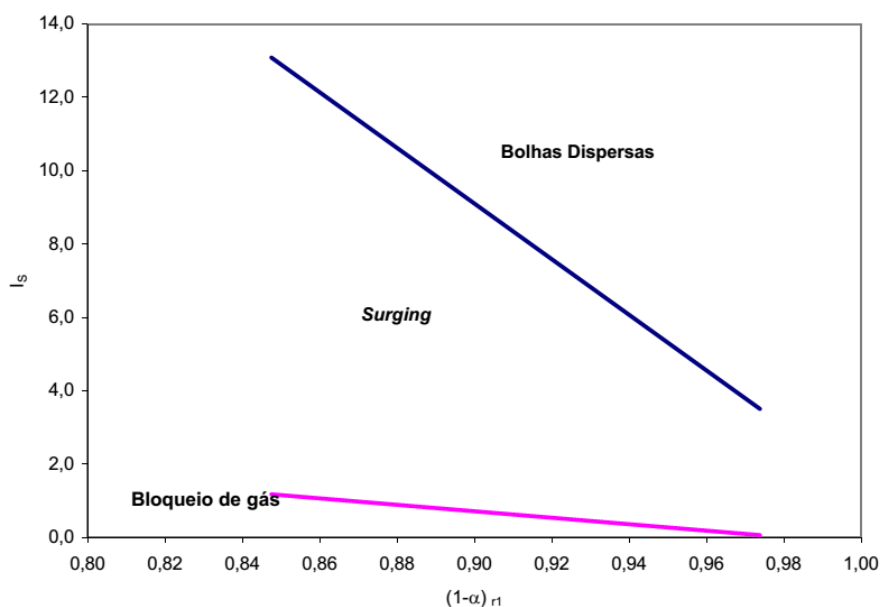


Figura 2.12 – Mapeamento dos padrões de escoamento bifásico no canal do impelidor de uma bomba, operando com água e ar, indicando as fronteiras para a ocorrência de *Surging* e bloqueio de gás no canal do impelidor (Estevam, 2002).

Caso  $I_s$  seja menor que um valor crítico, a força devido ao campo centrífugo é maior que a força de arrasto e a bolha não é capaz de escoar para fora do impelidor. O gás coalesce

dentro do impelidor impactando severamente no desempenho da bomba, indicando a região de *Surging* no mapa da Figura 2.12. Finalmente, se o efeito de segregação devido ao campo centrífugo for dominante, o bolsão de gás originado da coalescência das bolhas ocupa todo o canal do impelidor. Essa situação indica a região de bloqueio de gás no mapa de padrões proposto.

Duran (2003) deu sequência nos estudos iniciados por Pessoa e Prado (2001). O autor mediu, experimentalmente, o desempenho da BCS GC6100 de 22 estágios operando com a mistura água-ar. Os ensaios foram realizados para pressões de sucção variando entre 50 e 350 psi, vazões de gás de 5000 a 90000 scfp e vazões de líquido entre 2000 a 6950 scfd, em um total de 1162 pontos experimentais. Analisando os dados de desempenho de um estágio em específico, o autor inferiu a existência três padrões de escoamento: bolhas, bolhas alongadas e transição. A Figura 2.13 mostra o resultado do desempenho da BCS operando com gás. O autor relaciona as vazões de líquido maiores que 5200 bpd com o padrão de escoamento do gás em bolhas. A queda abrupta que ocorre na vazão de 5200 bpd é relacionada a mudança do padrão bolhas para transição. No regime de transição, a derivada da pressão em função da vazão se inverte, resultando em uma redução da pressão com o decrescimento da vazão, levando a instabilidade do sistema de bombeio. O padrão de bolhas alongadas é inferido como sendo o arranjo entre as fases para vazões de líquido a baixo de 4200 bpd.

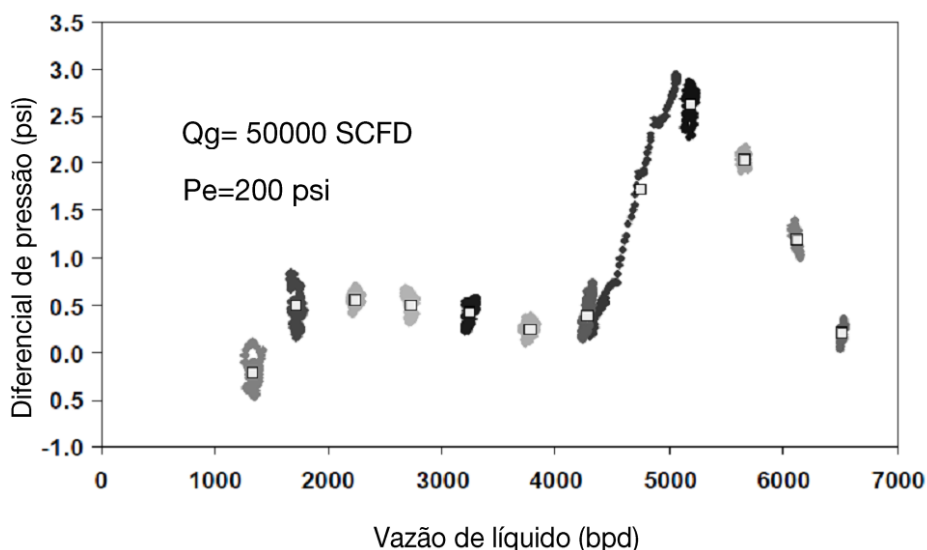


Figura 2.13 – Curva de desempenho da BCS GC6100 operando com mistura água-ar, rotação de 3000 rpm, vazão de gás de 50000 scfd e pressão de sucção de 200 psi (Duran, 2003).

O autor sustenta que o modelo homogêneo não representa o desempenho da bomba, especialmente quando ela opera com bolhas alongadas ou na região de transição. Portanto, são



propostas correlações para modelar o desempenho da bomba para os diferentes padrões de escoamento. Outras correlações foram desenvolvidas para modelar as regiões de transição entre os padrões de escoamento. O critério de *Surging*, que define os limites entre o escoamento de bolhas e o escoamento de transição, é dado pela Equação (2.113).

$$\frac{q_G}{q_{L,max}} = \left( 5,58 \frac{\rho_G}{\rho_L} + 0,098 \right) \left( \frac{q_L}{q_{L,max}} \right)^{1,421} \quad (2.113)$$

onde  $q_{L,max}$  é a vazão máxima de operação da bomba apenas com líquido.

Drozдов (2010) realizou um extenso estudo experimental sobre os principais fatores que influenciam o desempenho de bombas de BCS operando com misturas gás-líquido. Os fatores estudados foram fração de gás, pressão de sucção, tensão interfacial e viscosidade do líquido. A principal contribuição do autor está relacionada ao estudo da adição de surfactante na água. Segundo Drozдов (2010), a adição de surfactante reduz a tensão interfacial entre a água e o ar, diminuindo o tamanho das bolhas de gás e tornando a mistura mais estável. Dessa forma, existe uma dificuldade maior das bolhas coalescerem e assim, diminui-se o efeito de degradação do desempenho da BCS devido a presença de gás.

Gamboa (2011) realizou um amplo estudo experimental utilizando a BCS GC6100 de 22 estágios. Empregando a mistura água-ar, foram realizados teste de desempenho com pressões de sucção entre 100 psig e 250 psig, rotações até 3000 rpm e frações volumétricas de gás até 70%. Baseado nos resultados experimentais foram propostos mapas de desempenho bifásicos da bomba, mostrando os efeitos da rotação, pressão de sucção e frações de gás.

Utilizando uma modelagem baseada na análise dimensional e ajuste dos dados experimentais, o autor propôs uma correlação para indicar a vazão de gás no qual ocorre o *Surging*. Essa correlação, válida para elevadas vazões de líquido, é função das massas específicas e vazões volumétricas das fases, da rotação, do diâmetro do impelidor e da viscosidade cinemática, tal que:

$$\left( \frac{q_G}{q_{G,max}} \right) = \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,2} \left( \frac{\omega D^2}{\nu} \right)^{0,4} \left[ 0,102 e^{\left( \frac{q_L}{q_{L,max}} \right)} \right]^{4,4682} \quad (2.114)$$

onde  $q_{G,max}$  e  $q_{L,max}$  são as vazões volumétricas máximas utilizadas na normalização dos parâmetros.

Banjar *et al.* (2013) realizaram um dos primeiros estudos sobre o efeito da viscosidade do líquido no desempenho de BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido. Nesse estudo foi utilizada uma bomba de fluxo misto, modelo DN-1750, de sete estágios. A pressão diferencial foi medida através do quarto estágio, possibilitando assim o cálculo de seu desempenho. Como fluidos de trabalho os autores utilizaram ar e óleo mineral isoparafínico com viscosidades de 1, 1,2 e 8,5 cP. O procedimento experimental utilizado consisti na obtenção de curvas de desempenho de vazão de líquido *versus* incremento de pressão para vazões volumétricas de gás constantes. Os testes foram realizados com pressão de sucção de 40 psig, rotação da BCS de 1800 rpm e vazões de gás normalizadas variando entre 0 a 15%, sendo a vazão de líquido máxima a referência para a normalização.

Segundo os autores, os resultados experimentais mostraram que o aumento da viscosidade do líquido faz com que o *Surging* ocorra para vazões de gás menores, reduzindo a capacidade da bomba de operar na presença de gás. Nesse trabalho os autores consideraram dois critérios para identificar o início do *Surging*: a) o *Surging* inicia-se na vazão de líquido em que ocorre o máximo incremento de pressão na curva de desempenho, ou seja, ponto de máximo da curva; b) o *Surging* inicia-se na vazão de líquido onde começa um espalhamento dos dados experimentais, sendo esse segundo critério qualitativo.

Paternost (2013) realizou um estudo experimental para investigar a influência da viscosidade do líquido no desempenho de bombas centrífugas operando com escoamento bifásico. O aparato experimental foi construído utilizando uma bomba de voluta convencional que permitia a visualização do escoamento no duto de sucção.

Um dos objetivos desse estudo foi validar a modelagem de escoamento monofásico viscoso proposta por Solano (2009). Assim, o autor constatou que, para uma determinada velocidade específica, existe uma relação funcional constante entre o coeficiente de vazão e o coeficiente de elevação. Essa relação permanece inalterada independentemente da rotação e da viscosidade, tal que  $\Psi = f(\Phi, \omega_s)$ .

A partir da modelagem monofásica, foi verificado o comportamento das variáveis adimensionais na presença de gás. Identificou-se uma relação entre os dados bifásicos experimentais, representada pela variável  $X$ , com a calculada por meio das propriedades do líquido e da fração de vazio, possibilitando estimar sua magnitude, dada por:

$$\frac{X}{X_0} = 1 + c_1 \lambda \frac{F_C}{F_g} + c_2 \left( \lambda \frac{F_C}{F_g} \right)^2 \quad (2.115)$$

sendo:

$$\frac{F_C}{F_g} = \frac{\omega^2 r_m}{g} \quad ; \quad c_1 = 5,82 \quad ; \quad c_2 = 9,79 \quad (2.116)$$

onde as constantes  $c_1$  e  $c_2$  foram ajustadas através dos dados experimentais.

Biazussi (2014) realizou um amplo trabalho experimental para estudar o desempenho de BCSs operando com escoamento bifásico gás-líquido. Utilizando a mistura água-ar, foram testados três modelos de BCS: P23, P47 e P100, todas com três estágios. A matriz experimental envolveu testes com rotação variando entre 1800 e 3500 rpm, pressão de sucção de 100 a 500 kPa, e procedimentos experimentais a vazão de gás constante e a fração de gás constante.

Os resultados experimentais dos testes monofásicos com água foram interpretados por ajuste dos dados com um modelo de correlação genérico para o ganho de pressão e potência, tentando descrever todos os fenômenos físicos envolvidos no escoamento nos canais rotativos. Partindo do ajuste monofásico e considerando modelo de desligamento, o autor fez uma extensão para o desempenho bifásico da bomba. O trabalho de Biazussi (2014) é discutido em detalhes no Capítulo 5, pois serve de base para a modelagem do escoamento bifásico viscoso desenvolvido no presente trabalho.

Baseado nos estudos apresentados nesta revisão bibliográfica sobre desempenho de BCSs operando com escoamento bifásico gás-líquido, são feitas as seguintes conclusões:

- Quase que a totalidade dos estudos experimentais sobre BCSs operando na presença de gás foram realizados utilizando a mistura água-ar. A escolha dessa mistura é compreensiva, devido à facilidade de operação e custos. No entanto, as propriedades da mistura água-ar são bastante distintas da mistura óleo-gás natural. Uma propriedade que distingue bem essas misturas é a viscosidade da fase líquida. O efeito da viscosidade no escoamento bifásico gás-líquido em BCSs foi explorado apenas por Banjar *et al.* (2013), que ainda assim, considerou viscosidade máxima de 8,5 cP. Portanto, a produção de campos de óleo pesados, ou produção de emulsões que elevam a viscosidade do líquido, demandam novos estudos que considerem os efeitos viscosos.

– Inovações recentes possibilitam que a BCS seja instalada na forma de *skid* no leito marinho, reduzindo os custos de intervenção. Nesse tipo de configuração a BCS opera em uma inclinação próxima da horizontal, diferente das aplicações em poços onde a inclinação é aproximadamente vertical. Não há na literatura aberta nenhum estudo que relacione o desempenho bifásico da BCS com sua inclinação. Embora o campo gravitacional seja muito inferior ao campo centrífugo, o arranjo entre as fases na sucção da bomba pode ser alterado pela inclinação, afetando, assim, o desempenho do sistema de bombeio. Estudos abordando esse tema são de grande interesse para aplicações em campo.

– Em termos de modelagem do escoamento bifásico em BCSs, a abordagem por meio de correlações empíricas ainda é a mais usual. Alguns trabalhos, tais como Estevam (2002), Gamboa (2011) e Biazussi (2014) adotam modelos mais consistentes com base fenomenológica. O trabalho de Biazussi (2014), baseado no modelo de deslizamento, mostrou bons resultados para fluidos de baixa viscosidades. Uma extensão do modelo levando em consideração os efeitos viscosos seria um considerável avanço no esforço de obter um modelo que represente a operação da bomba em condições mais realísticas.

### **2.2.3 Visualização de Escoamento Bifásico Gás-Líquido em Bombas Centrífugas**

Estudos experimentais vêm sendo desenvolvidos por diversos autores para investigar o comportamento do escoamento bifásico gás-líquido sujeito a campos centrífugos. A visualização desse tipo de escoamento é uma ferramenta fundamental para compreender sua dinâmica, assim como caracterizar o arranjo topológico das fases em função das propriedades dos fluidos e condições operacionais. Esses resultados servem de base para a modelagem do escoamento, que tem como objetivo prever o comportamento da bomba operando na presença de uma fase compressível.

Os primeiros estudos experimentais de visualização foram aplicados a área nuclear, onde destacam-se os trabalhos de Murakami *et al.* (1974a), Murakami *et al.* (1974b), Patel *et al.* (1978), Sekoguchi *et al.* (1984), Kim *et al.* (1985), Sato *et al.* (1996), Takemura *et al.* (1997), Andras (1997), Suryawijaya (2001), Thum *et al.* (2006) e Poulikkas (2010). A maioria desses trabalhos foram realizados com bombas de voluta de um estágio, grandes diâmetros e utilizaram a mistura água-ar. Assim, esses estudos não são aplicáveis diretamente a bombas de BCS, que

possuem múltiplos estágio, pequenos diâmetros e operam com fluidos de propriedades distintas da mistura água-ar.

Essa seção da revisão da literatura é focada, apenas, em trabalhos experimentais de visualização de escoamento voltados a indústria do petróleo.

Estevam (2002) realizou um estudo pioneiro e desenvolveu o primeiro protótipo de visualização baseado em uma BCS. O protótipo construído em acrílico transparente teve como objetivos visualizar e analisar qualitativamente o escoamento no interior do impelidor, possibilitando assim, a compreensão fenomenológica do escoamento. Em função da proporção volumétrica do gás na mistura bifásica e das condições operacionais, o autor identificou dois padrões de escoamento no canal do impelidor da bomba, que são descritos a seguir.

- Bolhas dispersas: bolhas de diâmetro médio inferior a um valor crítico, que escoam carregadas pelo líquido através do impelidor sem coalescência.

- Bolhas alongadas: devido à coalescência das bolhas menores, ocorre a formação de uma grande bolha alongada estacionária que ocupa a entrada do impelidor. Ao redor da bolha estacionária escoam predominantemente líquido. O gás entra na bomba e é agregado à bolha estacionária. Na extremidade final da bolha alongada há a chamada região de remistura, na qual bolhas de gás discretas desprendem-se da bolha alongada e são incorporadas ao escoamento de líquido.

A Figura 2.14 representa esquematicamente a visualização experimental da bolha alongada e a região de remistura na aresta de saída do impelidor.

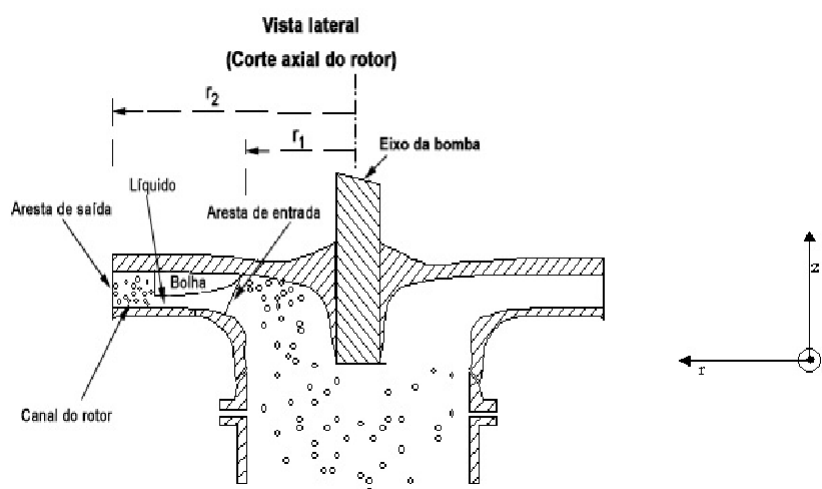
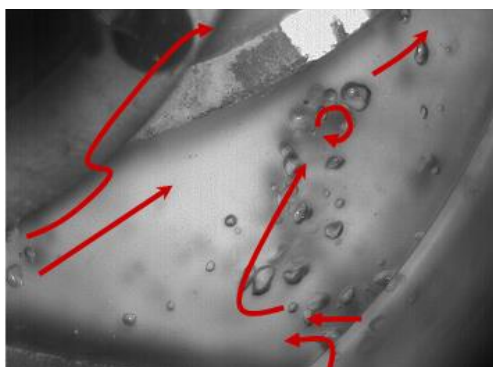


Figura 2.14 – Representação esquemática do impelidor mostrando a bolha alongada e a região com escoamento em bolhas dispersas (Estevam, 2002).

Baseado nos dois padrões observados experimentalmente, Esteavam (2002) definiu um mapa de operação da bomba centrífuga operando com escoamento bifásico gás-líquido. Para o escoamento do gás em bolhas dispersas, o ganho de pressão da bomba é similar ao escoamento monofásico. No entanto, para o padrão de bolha alongada, o autor descreve que a transferência de energia para o fluido é prejudicada, pois somente parte do canal do impelidor continua útil para o escoamento do líquido. O padrão de bolhas alongadas também foi associado aos fenômenos de *Surging* e *Gas Locking*.

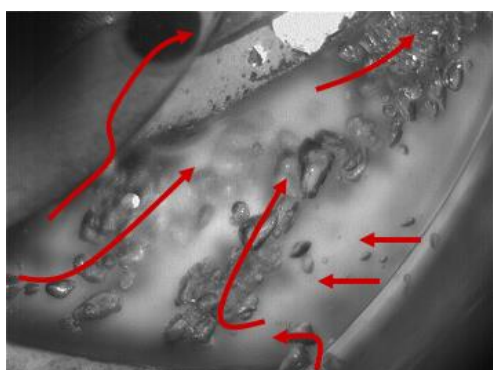
Barrios (2007) realizou um trabalho teórico-experimental que teve como objetivos determinar o padrão de escoamento e o comportamento das bolhas no interior de BCSs, assim como modelar as condições operacionais que causam instabilidades no funcionamento da bomba. A autora desenvolveu um aparato experimental baseado em uma BCS convencional que permitisse a visualização do escoamento no interior dos canais do impelidor. A filmagem de alta velocidade foi utilizada como técnica de visualização para estudar a dinâmica do escoamento e medir o diâmetro das bolhas de gás.



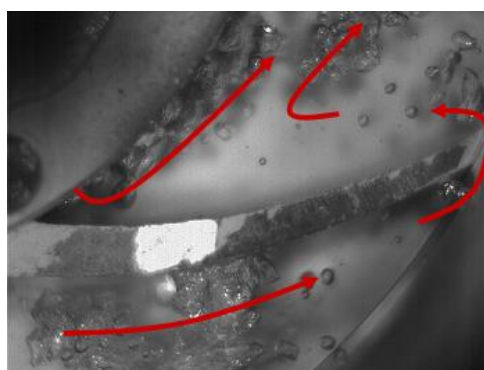
(a)



(b)



(c)



(d)

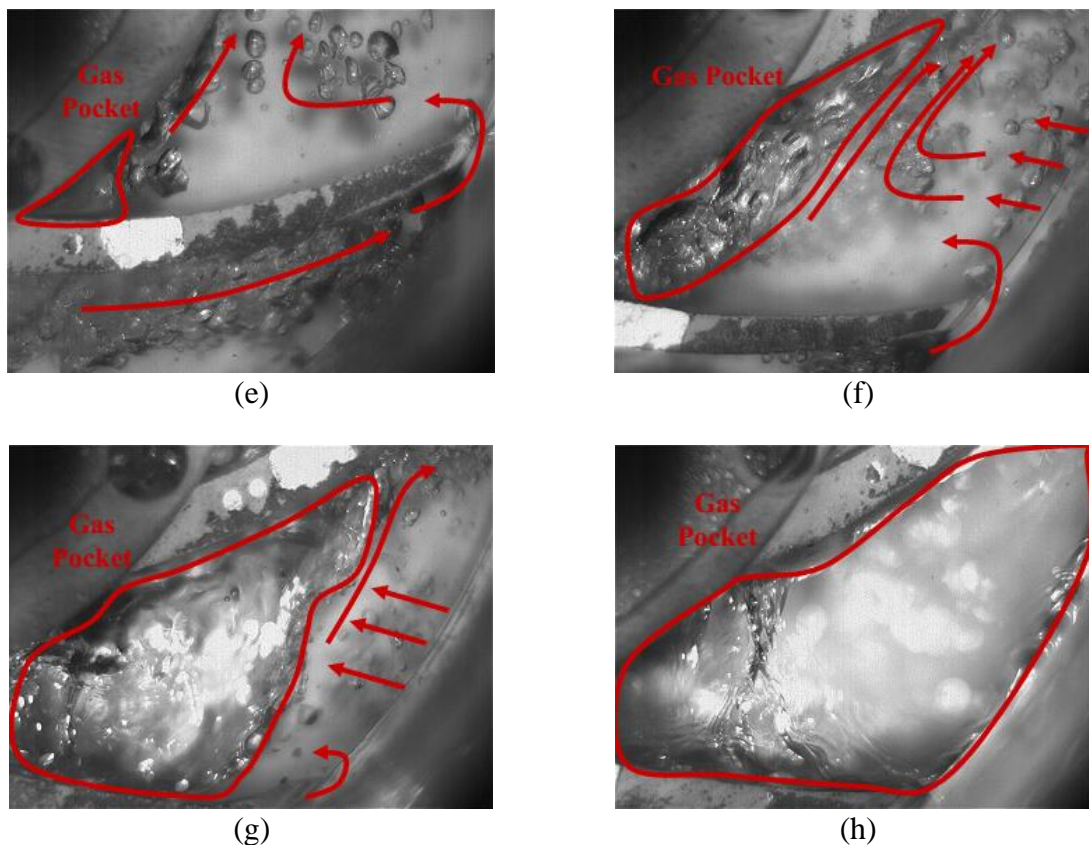


Figura 2.15 mostra a visualização do escoamento para um teste de desempenho a 600 rpm e vazão de ar constante de 0,15 scf/h (0,25 m<sup>3</sup>/h). Nesse teste a vazão de água é gradualmente reduzida, e consequentemente, a fração volumétrica de gás aumenta. As condições operacionais (a) e (b) referem-se as menores frações de gás. Nessas condições as bolhas de gás se desviam da trajetória do líquido e escoam em direção a região de alta pressão das pás do impelidor. Pequenas recirculações também são verificadas. Com o aumento da fração de gás, condição (c), as bolhas aumentam de diâmetro indicando coalescência que aumenta até a condição (d), em que há acumulação de bolhas na entrada do canal e intensificação da recirculação. As condições (e) e (f) são caracterizadas pela formação de uma bolha estacionária na entrada do impelidor. Aumentando-se a fração de gás, a bolha estacionaria aumenta consideravelmente de tamanho, passando a ocupar grande parte do canal do impelidor, condição (g). Por fim, na condição (h), a bolha estacionária de gás estende-se em direção a saída do impelidor, ocupando toda a extensão do canal.

Baseada nas observações experimentais, a autora propôs duas abordagens para modelar o escoamento no interior da BCS. A primeira delas foi uma modelagem mecanicista, unidimensional, fundamentada no balanço das forças centrífuga, de arrasto e pressão que atuam nas bolhas de gás.



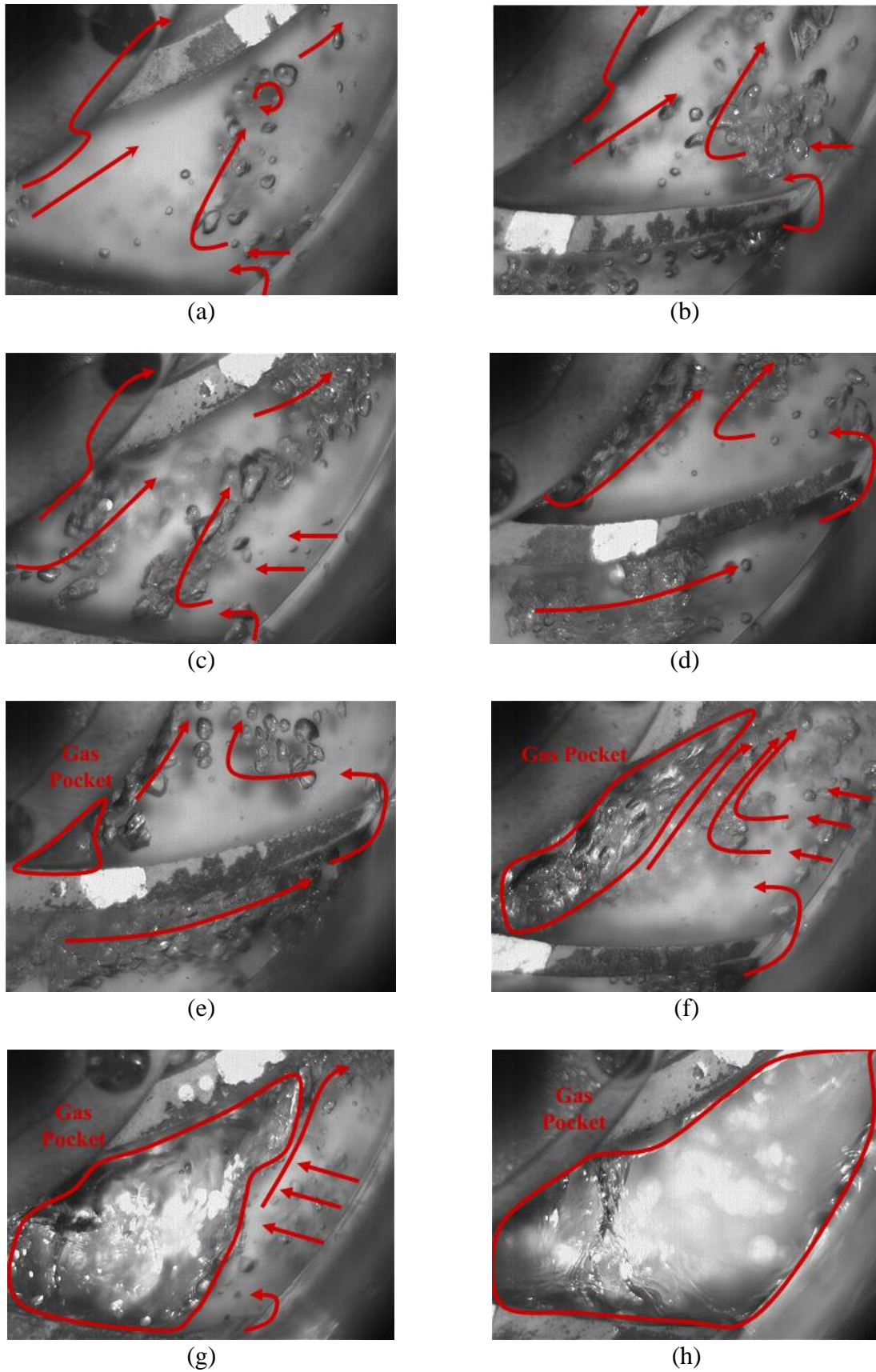


Figura 2.15 – Visualização do escoamento no interior dos canais do impelidor (Barrios, 2007).



Esse modelo depende de duas variáveis importantes. A primeira é o diâmetro da bolha que causa sua estagnação no interior do impelidor e a segunda é coeficiente de arrasto. O modelo tem como premissa que, para tamanhos de bolhas inferiores a um crítico, a força de arrasto as leva até o difusor. As bolhas maiores ficam estacionárias na admissão e coalescem com novas de mesmo diâmetro. Essa abordagem apresentou bons resultados ao serem comparados com os dados experimentais.

A segunda abordagem proposta foi utilizando CFD para simular numericamente o escoamento. As simulações monofásicas foram utilizadas para investigar se a recirculação do líquido tem influência nas recirculações das bolhas de gás visualizadas experimentalmente. Já as simulações bifásicas tiveram como objetivo comparar a correlação proposta pela autora para o coeficiente de arrasto em campos girantes com a correlação utilizada nos códigos de CFD.

Gamboa (2009) investigou experimentalmente o escoamento bifásico gás-líquido em bombas de BCS. Utilizando impelidores e estatores de uma BCS convencional o autor projetou um protótipo de visualização de dois estágios. O impelidor foi modificado retirando-se parte do *shroud*, deixando expostas as pás e os canais, criando, assim, uma janela de visualização. Entre o estator de entrada e o impelidor foi projetada uma outra janela de visualização, construída através do espaçamento entre esses componentes, possibilitando a visualização da região de entrada do impelidor. Os testes experimentais foram realizados com rotações entre 600 e 1000 rpm, pressão de sucção de 2 psig e frações volumétricas de gás de até 10%. Como fluido de trabalho foram utilizadas diferentes combinações, tais como água e ar, água e hexafluoreto de enxofre e soluções de isopropanol em água e ar.

A Figura 2.16 mostra os padrões de escoamento visualizados por Gamboa (2009) em um teste utilizando a mistura água-ar, rotação de 600 rpm, pressão de sucção de 2 psig e vazão de água normalizada de 0,6, sendo a referência para a normalização a vazão máxima no escoamento monofásico. Nesse teste a vazão de gás é aumentada, gradualmente, desde a vazão zero, mantendo-se a vazão de líquido constante. O autor identificou quatro padrões de escoamento: (a) *Isolated Bubbles*, (b) *Bubble Flow*, (c) *Gas Pocket* e (d) *Segregated Gas*, que são descritos a seguir.

– *Isolated Bubbles*: a bomba apresenta o mesmo ganho de pressão do escoamento monofásico. O termo “isoladas” refere-se a distância entre as bolhas, que é suficiente para que não ocorra interação entre elas.

– *Bubble Flow*: com o aumento da fração volumétrica de gás, a dimensão das bolhas e o tamanho da população aumentam significativamente. As bolhas menores são carregadas pelo líquido, enquanto parte das bolhas maiores ficam recirculando no interior dos canais do impelidor. Devido ao aumento da dimensão das bolhas e da população, a interação entre elas é mais pronunciada e são observados aglomerados de bolhas.

– *Gas Pocket*: nesse padrão o autor descreve que o gás passa a formar uma fase contínuo no interior do impelidor. O gás forma uma grande bolha que se estende desde a entrada até o meio do canal. A transferência de energia para o líquido é severamente prejudicada quando esse padrão é observado.

– *Segregated Gas*: partindo-se do padrão anterior, o aumento da fração de gás faz com que a bolha estacionária cresça e ocupe toda a extensão dos canais do impelidor. Ainda neste caso, verifica-se o padrão de bolhas dispersas na entrada do impelidor.

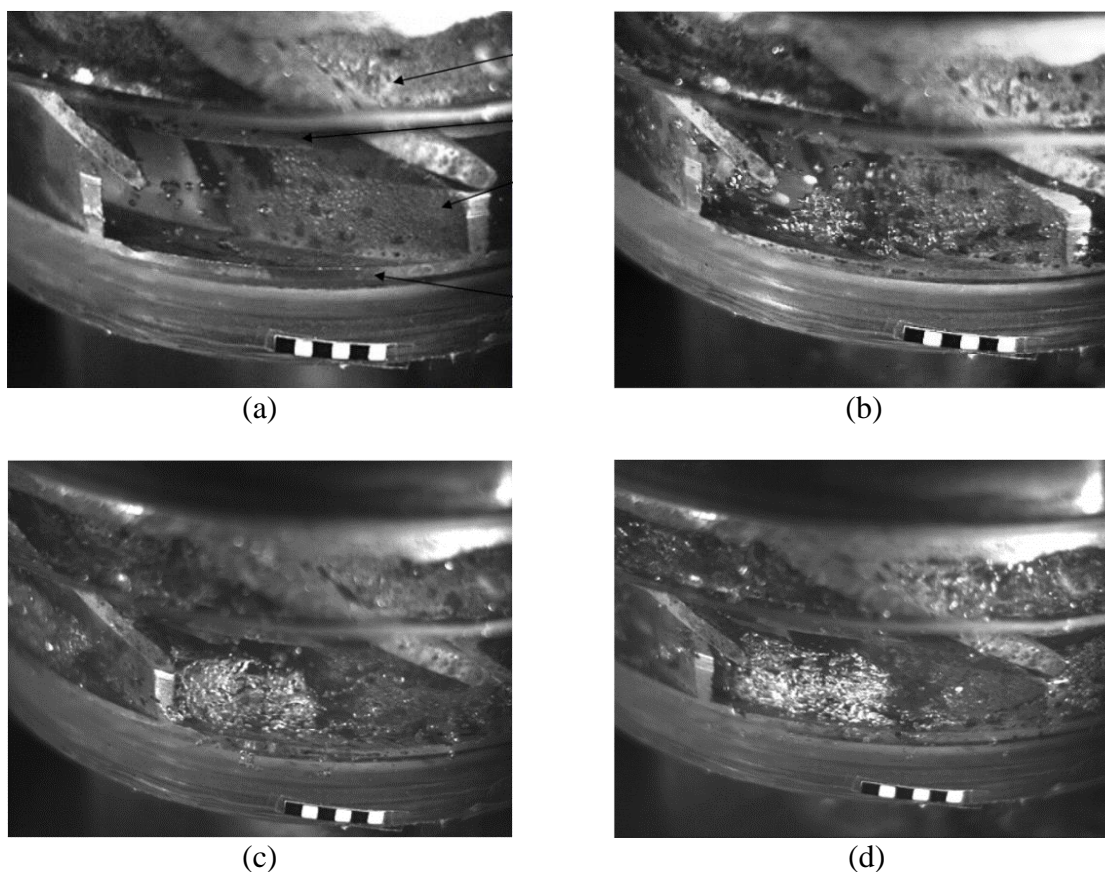


Figura 2.16 – Padrões de escoamento gás-líquido em impelidores de BCSs (Gamboa, 2008).

Trevisan (2009) conduziu um trabalho experimental para estudar a influência da viscosidade no desempenho bifásico de bombas centrífugas. Um dos principais objetivos do

trabalho foi identificar os padrões de escoamento no interior da bomba e como esses padrões são influenciados pela viscosidade do líquido. Utilizando como referência os trabalhos de Barrios (2007) e Gamboa (2008), o autor alterou uma BCS convencional de forma a possibilitar a visualização do escoamento. A principal modificação consistiu em aumentar a distância entre dois estágios e inserir uma janela de visualização, permitindo assim, o acesso visual a entrada do impelidor. Os testes foram realizados com as misturas água-ar e óleo-ar, rotações de 15, 25 e 30 Hz e viscosidades entre 1 a 161 cP. A técnica escolhida para visualizar o escoamento foi a filmagem de alta velocidade, onde foram utilizadas velocidade do obturador entre 50 e 100 ms e taxas de aquisição de 600 a 1000 fps, dependendo da rotação da bomba.

Nos testes com a mistura água-ar o autor identificou quatro padrões de escoamento no interior do impelidor: *Bubble Flow*, *Agglomerated Bubbles*, *Gas Pocket* e *Segregated Gas*. Para os testes com a mistura óleo-ar foi identificado, além dos três últimos citados, o padrão *Intermittent Gas*. A seguir, são apresentados e descritos os padrões de escoamento gás-líquido obtidos por Trevisan (2009).

– *Bubble Flow*: padrão de escoamento encontrado para vazões extremamente baixas de gás, onde as bolhas apresentam formato esférico e pequenos diâmetros. As bolhas de gás seguem o mesmo trajeto do líquido dentro dos canais do impelidor. Em relação ao desempenho da bomba, para esse padrão de escoamento, o diferencial de pressão gerado é próximo do previsto pelo modelo homogêneo. A Figura 2.17 ilustra o padrão *Bubble Flow* observado pelo autor.

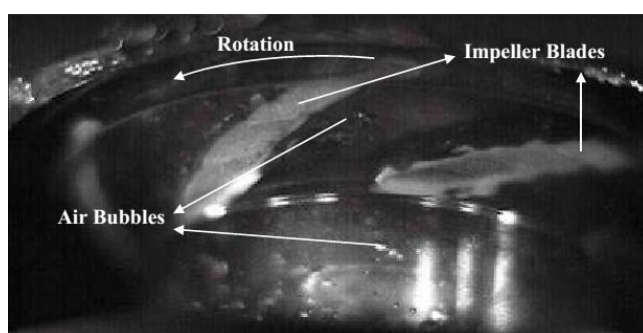


Figura 2.17 – Padrão *Bubble Flow* (Trevisan, 2009).

– *Agglomerated Bubbles*: esse padrão de escoamento, mostrado na Figura 2.18, é caracterizado pelo acúmulo de bolhas na região de pressão das pás do impelidor, onde ocorre a coalescência das bolhas. Para os testes com a mistura óleo-ar, a viscosidade reduz a turbulência facilitando o coalescimento das bolhas.

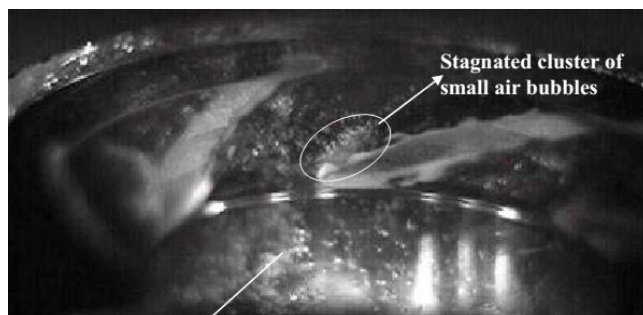


Figura 2.18 – Padrão *Agglomerated Bubbles* (Trevisan, 2009).

– *Gas Pocket*: com o aumento da fração de gás, o coalescimento descrito no padrão anterior aumenta formando uma grande bolha estacionária. Essa estrutura estacionária ocupa grande parte do impelidor, restringindo a área útil para o escoamento do líquido. A interface gás-líquido da bolha estacionária se mostrou bastante instável com a mistura água-ar, enquanto para a operação com óleo-ar, a interface mostrou-se mais estável. A Figura 2.19 mostra a visualização do escoamento para o padrão *Gas Pocket*.

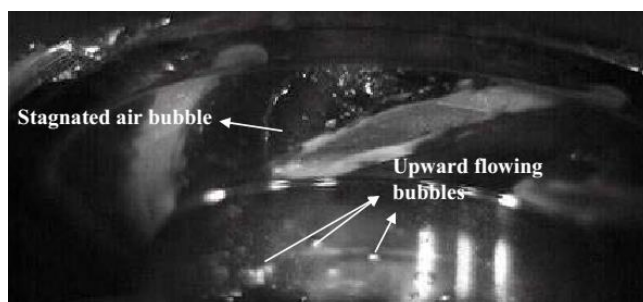


Figura 2.19 – Padrão *Gas Pocket* (Trevisan, 2009).

– *Segregated Gas*: as características desse padrão de escoamento, Figura 2.20, são bastante parecidas com o padrão anterior, no entanto a bolha estacionária passa a ocupar toda a extensão do impelidor. A fase gasosa torna-se contínua, impactando, severamente, no desempenho da bomba.

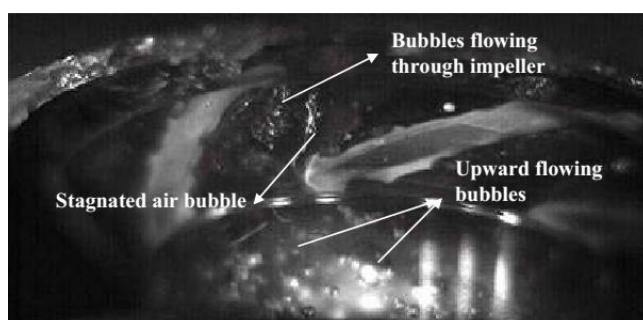


Figura 2.20 – Padrão *Segregated Gas* (Trevisan, 2009).

– *Intermittent Gas*: visualizado apenas com a mistura óleo-ar, esse padrão de escoamento é similar ao anterior. A principal diferença, entretanto, é a presença de grandes bolhas irregulares na entrada do impelidor, além da bolha estacionária. Esse padrão de escoamento é mostrado na Figura 2.21.

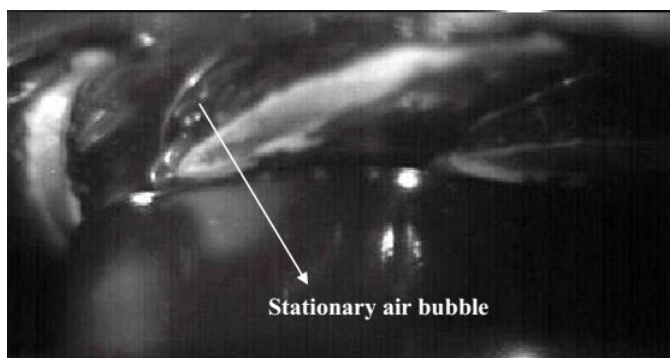


Figura 2.21 – Padrão *Intermittent Gas* (Trevisan, 2009).

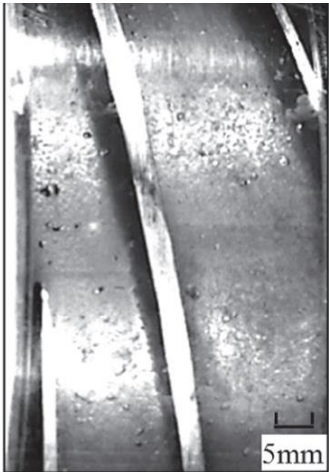
Comparando as imagens com os dados de desempenho, o autor concluiu que o padrão de escoamento *Agglomerated Bubbles* é responsável pelo início da degradação do desempenho da bomba. A ocorrência do *Surging* coincide com a presença do padrão *Gas Pocket*, indicando que esse fenômeno é um problema de instabilidade interfacial. Em relação aos efeitos da viscosidade do líquido, o autor observou a diminuição da turbulência, favorecendo o aumento do tamanho das bolhas de gás, provocando a ocorrência do *Surging* para frações de gás menores em comparação com a água.

Recentemente, Zhang *et al.* (2015) estudaram, experimentalmente, os padrões de escoamento gás-líquido na seção de entrada e no interior dos impelidores de uma bomba centrífuga axial de três estágios. Os padrões de escoamento foram investigados utilizando a técnica de filmagem de alta velocidade, sendo a mistura água-ar utilizada como fluido de trabalho. Os autores classificaram em quatro os padrões de escoamento no interior dos impelidores da bomba: *Isolated Bubble Flow*, *Bubbly Flow*, *Gas Pocket Flow* e *Segregated Gas Flow*. Esses padrões de escoamento são mostrados na Figura 2.22.

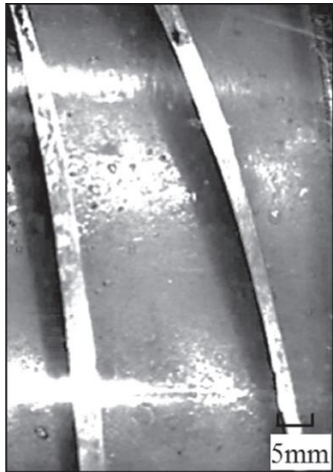




1° Estágio



2° Estágio  
(a)



3° Estágio



1° Estágio



2° Estágio  
(b)



3° Estágio



1° Estágio

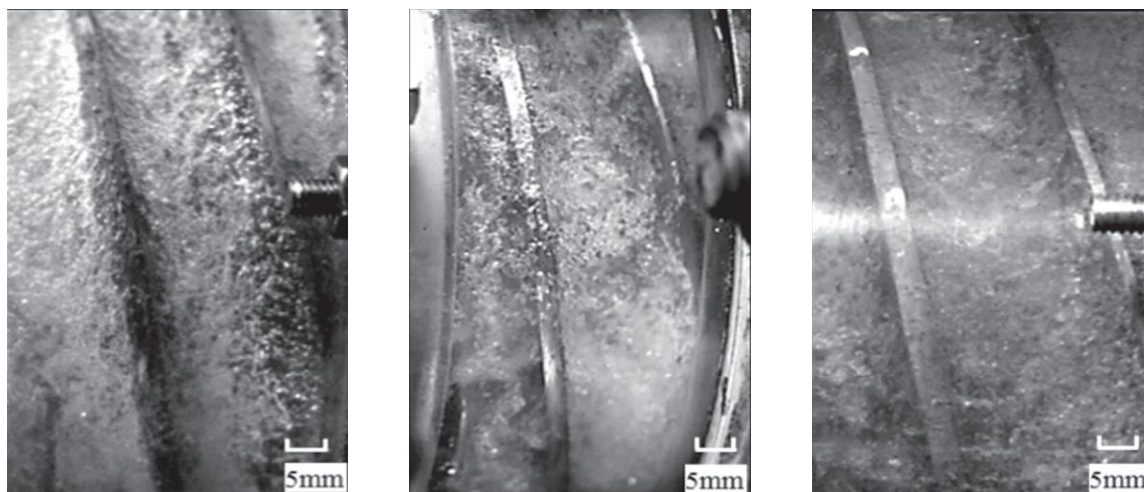


2° Estágio



3° Estágio

(c)



1° Estágio

2° Estágio

3° Estágio

(d)

Figura 2.22 – Padrões de escoamento gás líquido observados no interior de uma bomba axial de três estágios (Zhang *et al.*, 2015). (a) *Isolated bubble flow*,  $\omega=2700$  rpm e  $\lambda=0,8$  %. (b) *Bubbly flow*,  $\omega=2100$  rpm e  $\lambda=8$  %. (c) *Gas pocket flow*,  $\omega=2400$  rpm e  $\lambda=23$  %. (d) *Segregated gas flow*,  $\omega=2700$  rpm e  $\lambda=42$  %.

O padrão *Isolated Bubble Flow* foi visualizado nos três estágios da bomba para pequenas frações de gás. Com o aumento dessa fração, o diâmetro das bolhas de gás e o tamanho da população aumentam, sendo predominante o padrão *Bubbly Flow*. Com o aumento sucessivo da fração de gás, surge o padrão *Gas Pocket Flow* no primeiro estágio, enquanto o padrão *Bubbly Flow* permanece predominante no segundo e terceiro estágios. Conforme a fração de gás aumenta o padrão *Gas Pocket Flow* se estende para os demais estágios. O padrão *Segregated Gas Flow* foi observado como o arranjo final das fases devido ao aumento da fração de gás.

Diante do exposto nos estudos apresentados nesta revisão bibliográfica, sobre a visualização do escoamento bifásico gás-líquido em BCSs, são feitas as seguintes conclusões:

- Os trabalhos citados acima são de grande relevância para o avanço no entendimento do escoamento bifásico gás-líquido sujeito a intensos campos centrífugos. Fica evidente a dependência entre o arranjo entre as fases e a capacidade da bomba de transferir energia ao fluido. No entanto, não há consenso sobre a classificação dos padrões e suas transições.

– As imagens obtidas, experimentalmente, requerem uma melhor resolução, a fim de possibilitar a identificação da trajetória das bolhas, medição de dimensões características e fenômenos de coalescência e quebra.

– A maioria dos trabalhos restringe a visualização do escoamento em apenas uma região específica da bomba, não sendo possível um entendimento de como o escoamento se comporta simultaneamente em todos os canais do impelidor.

– A relação entre os padrões de escoamento e as propriedades dos fluidos ainda é pouco explorada. Existe uma demanda por novos estudos que definam a dependência do desempenho da bomba e do arranjo entre as fases em função, por exemplo, da viscosidade e da tensão superficial.

– Não existe consenso na literatura para as definições dos fenômenos de *Surging* e *Gas Locking*. Assim como não existe uma metodologia de teste padrão para definir a influência da fase gasosa no desempenho da bomba. A visualização do escoamento nos diferentes tipos de testes propostos na literatura pode contribuir para que se estabeleça a relação entre eles.



### 3 VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO NO INTERIOR DO IMPELIDOR

Este capítulo apresenta os resultados experimentais da visualização do escoamento bifásico gás-líquido no interior do impelidor de uma BCS. Para isso, o capítulo é dividido em três seções. Inicialmente, é apresentado o protótipo de visualização desenvolvido para a realização dos testes. A segunda seção contém o programa experimental, em que são apresentados o aparato experimental, os fluidos de trabalho e os procedimentos. Finalmente, a terceira seção apresenta os padrões de escoamento gás-líquido identificados no interior do impelidor, assim como os resultados de desempenho bifásico do protótipo de visualização.

#### 3.1 Protótipo de Visualização

Com o objetivo de visualizar os padrões de escoamento em BCSs, foi projetado e construído um protótipo que permitisse acesso visual ao interior dos canais do impelidor. A construção desse protótipo foi realizada com base no estágio de uma BCS modelo P23, amplamente utilizada na produção de petróleo. A bomba selecionada, operando com água a 3500 rpm, fornece no BEP a vazão de 15,2 m<sup>3</sup>/h e elevação de 17 m, por estágio. As características geométricas do impelidor utilizado são apresentadas na Figura 3.1 e Tabela 3.1.

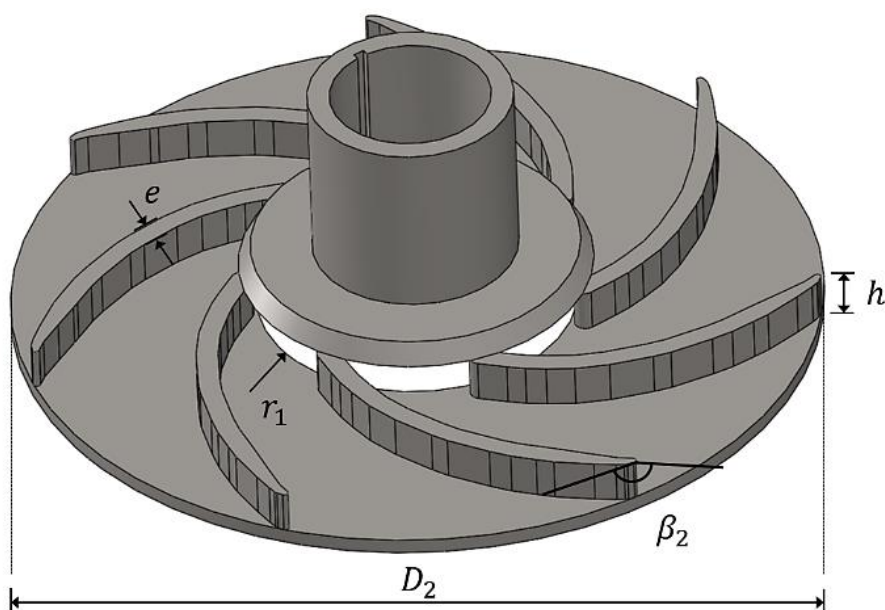


Figura 3.1 – Padrões Principais dimensões do impelidor da BCS P23.

Tabela 3.1 – Características geométricas do impelidor da BCS P23

Parâmetro	Valor
Raio da aresta de entrada – $r_1$	22,1 mm
Diâmetro da aresta de saída – $D_2$	111,4 mm
Ângulo da pá na aresta de saída – $\beta_2$	46,8°
Espessura da pá – $e$	2,2 – 3,1 mm
Altura da pá – $h$	6 mm
Número de pás	7

O modelo de BCS P23 foi escolhido devido ao fato de o impelidor possuir geometria radial e profundidade constante dos canais. Essas características geométricas facilitam as modificações necessárias para permitir a visualização do escoamento no interior do impelidor. A profundidade relativamente pequena do canal diminui o efeito de tridimensionalidade do escoamento e facilita a obtenção do foco na imagem.

A premissa básica considerada no projeto do protótipo foi alterar, minimamente, a geometria do impelidor, mantendo o desempenho original do equipamento. A Figura 3.2 apresenta o estágio original da BCS P23 e a Figura 3.3 mostra o projeto com as alterações propostas para permitir o acesso visual ao interior do impelidor.



Figura 3.2 – Estágio original da BCS P23.

Devido ao impelidor da BCS P23 ser do tipo fechado, foi necessário retirar o *shroud* superior de aço e substituí-lo por um fabricado em acrílico transparente. Esse *shroud* transparente foi fixada nas pás do impelidor, mantendo sua característica fechada. Outra alteração necessária foi substituir o estator de saída original por um do tipo voluta que deixasse o impelidor exposto. As pás desse estator foram projetadas de forma a terem um ângulo de entrada igual ao ângulo de saída do fluido que deixa o impelidor no BEP, diminuindo, assim, as perdas hidráulicas do estágio. Para direcionar o fluido na entrada do impelidor, foi utilizado um estator original sem modificações.

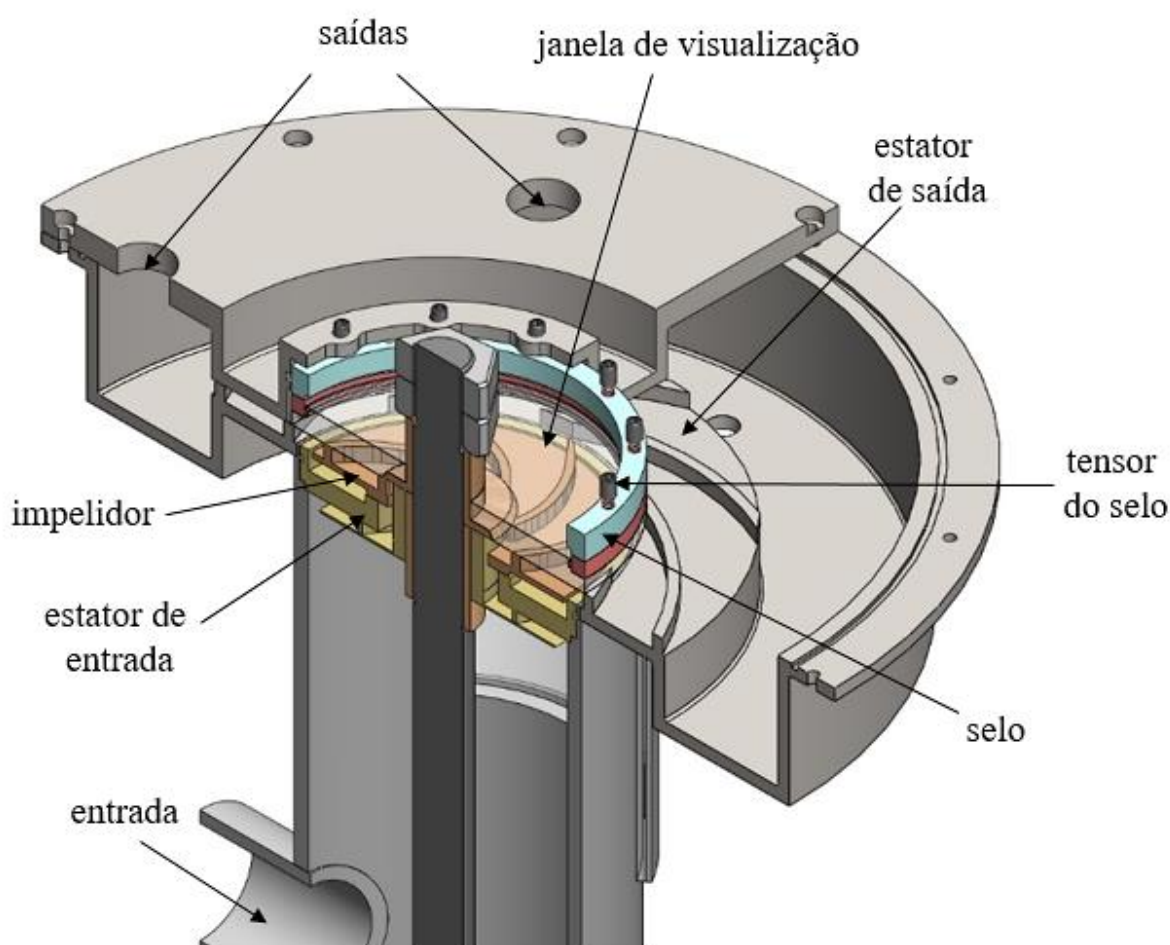


Figura 3.3 – Projeto do protótipo de visualização.

Devidos a essas alterações, foi necessário desenvolver uma solução para evitar o vazamento do fluido pressurizado entre o impelidor móvel e o estator de saída fixo. A vedação desses componentes foi conseguida utilizando-se um selo mecânico de face, projetado, especificamente, para essa aplicação. O selo mecânico é composto por duas peças. Um aro em aço inox retificado que é solidário ao impelidor e um aro de grafite, também retificado, que é

fixo ao estator de saída. A vedação é feita, mecanicamente, devido ao contato entre as faces dos aros. Como o eixo da bomba é flutuante e existe um movimento axial, a pressão da interface do selo varia com o ponto de operação da bomba. Para compensar essa variação de força normal no selo, foram projetados tensores com molas, em que é possível ajustar sua pré-carga.

A Figura 3.4 mostra a janela de visualização construída, permitindo o acesso a todos os canais do impelidor. O impelidor foi pintado na cor branca para aumentar o contraste entre as fases e melhorar a qualidade das imagens. Essa modificação foi realizada após testes iniciais com o acabamento original do impelidor que não forneceram imagens de qualidade satisfatória. Além dessa janela, uma outra foi construída entre o ponto de injeção de gás e a entrada do impelidor. Essa janela permite avaliar o arranjo entre as fases que entra no impelidor.

No APÊNDICE A, é apresentado em detalhes o projeto e construção do protótipo de visualização.

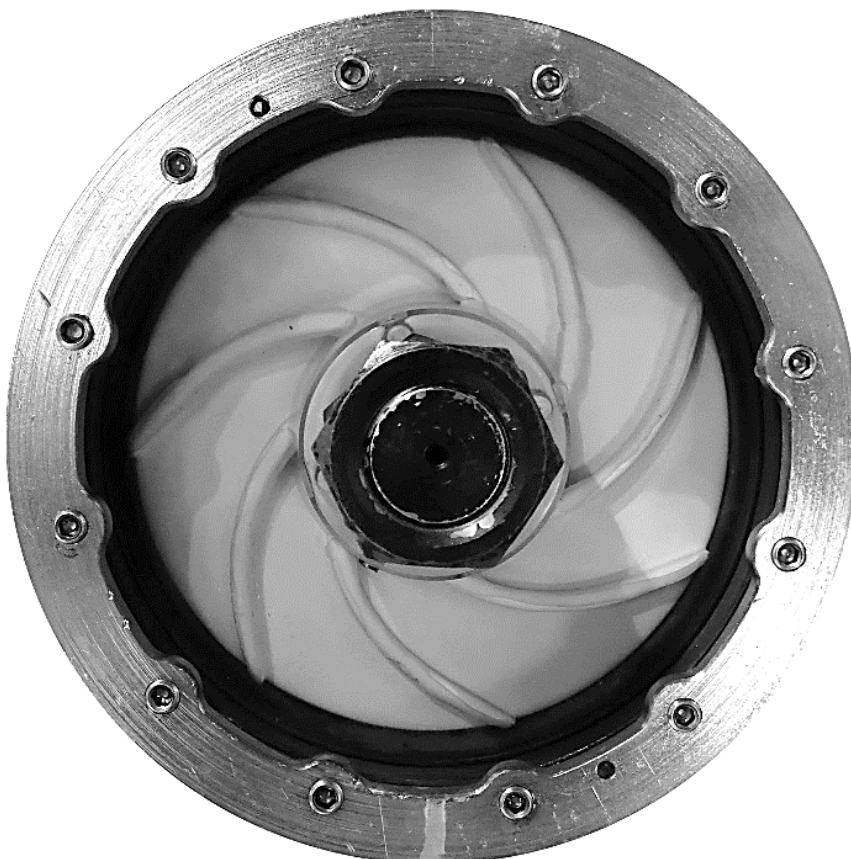


Figura 3.4 – Janela de visualização no impelidor.

## 3.2 Programa Experimental

### 3.2.1 Montagem Experimental A

O aparato experimental necessário para realização dos testes com o protótipo de visualização foi construído no Laboratório Experimental de Petróleo “Kelsen Valente” (LABPETRO) do Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO). Esse aparato experimental, chamado de Montagem Experimental A, é apresentado de forma esquemática na Figura 3.5. A Figura 3.6 mostra uma visão geral da montagem construída.

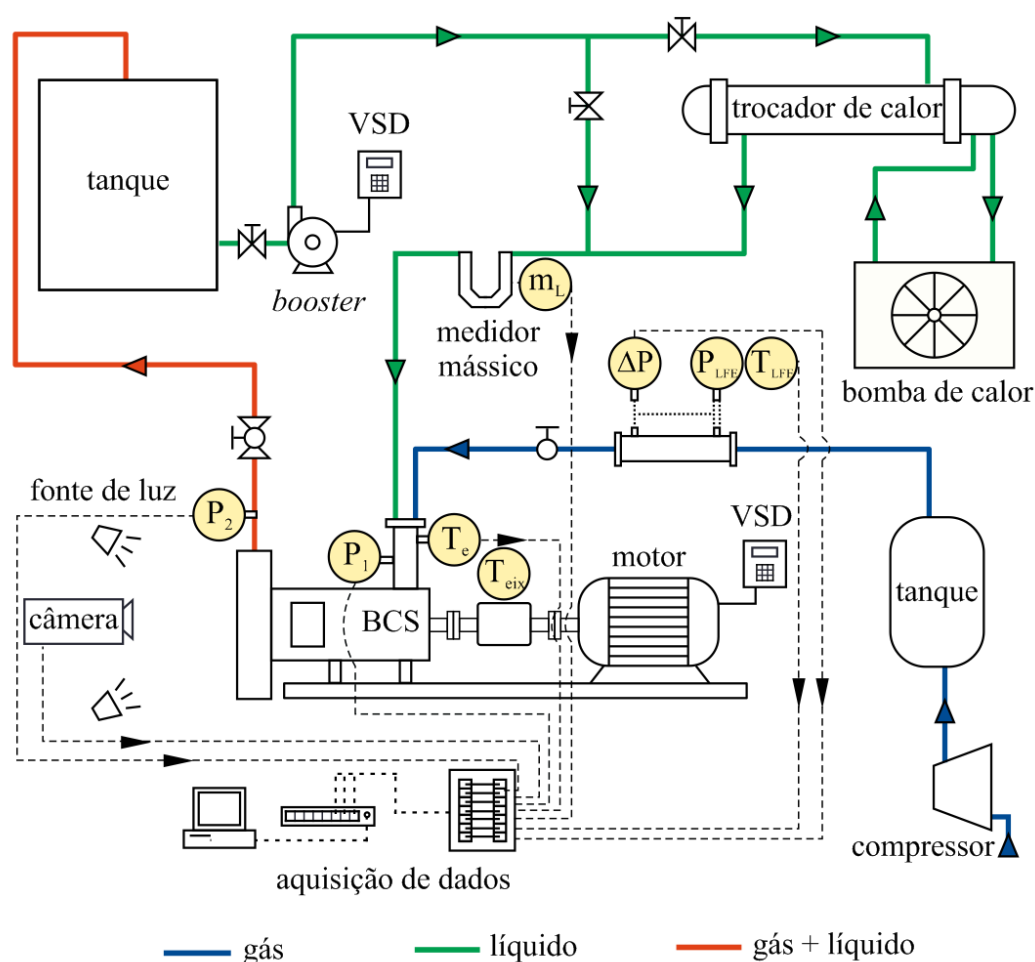


Figura 3.5 – Layout da Montagem Experimental A.

A Montagem Experimental A é constituída de tanque, tubulações, bomba *booster*, trocador de calor, bomba de calor, bomba protótipo, instrumentação e sistema de aquisição de dados. Conforme ilustrado no *layout* da Figura 3.5, uma bomba *booster* desloca o líquido do tanque para a linha de testes. Além de vencer as perdas de carga ao longo da tubulação e acessórios, a bomba *booster* tem a função controlar a pressão na entrada da bomba protótipo.



Esse ajuste de pressão na sucção da bomba protótipo é realizado pelo controle do variador de frequências (VSD) que aciona o motor da bomba *booster*. O líquido bombeado pela bomba auxiliar segue pela tubulação podendo passar por um trocador de calor tipo casco-tubo, caso o controle de temperatura seja necessário. Nesse trocador de calor, o fluido pode ser aquecido ou resfriado na faixa de temperatura de 5 a 56 °C. Antes de chegar à sucção da bomba protótipo, o fluido passa por um medidor de vazão mássico. O ar ambiente é utilizado como fase gasosa, que é comprimido e passa pelo medidor de vazão tipo laminador de fluxo antes de ser injetado na sucção da bomba protótipo. A mistura líquido-ar é bombeada pela bomba protótipo e retorna aos tanques, onde é feita a separação gravitacional das fases.

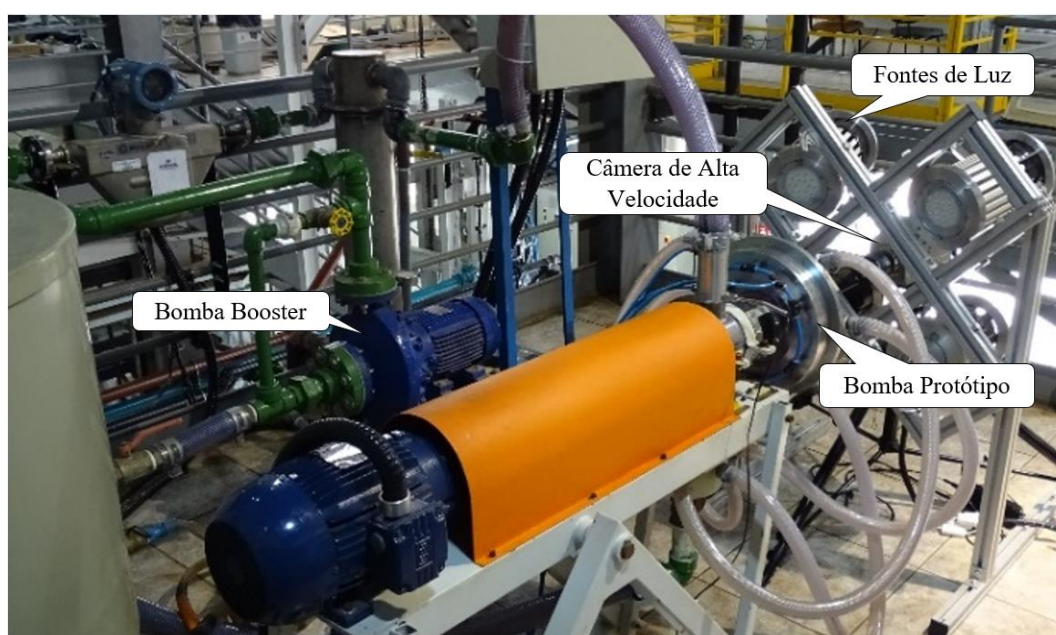


Figura 3.6 – Vista geral da Montagem Experimental A.

O controle de vazão da mistura bombeada é realizado por uma válvula manual tipo globo, instalada na tubulação de descarga, enquanto o controle da vazão de gás é realizado por uma válvula manual de precisão tipo agulha instalada na tubulação de ar.

A mistura das fases é feita no tubo de sucção da bomba. O ar comprimido é injetado na corrente de líquido por meio de orifícios de 0,5 mm de diâmetro. A mistura é promovida, diretamente, na sucção para evitar que o escoamento se desenvolva e as fases se segreguem. Dessa forma, obtém-se uma mistura em que o gás é succionado pela bomba na forma de bolhas.

A bomba protótipo é acionada por um motor elétrico de indução trifásico, 380 V, 5 CV, controlado por um VSD, que possibilita a realização dos ensaios em diferentes rotações. Entre o motor e a bomba protótipo, são instalados dois mancais de contato angular responsáveis

por suportar a força axial gerada pela bomba protótipo. Todo esse conjunto é montado em um *skid* articulado, que pode operar em qualquer inclinação entre as direções horizontal e vertical.

A Tabela 3.2 apresenta em detalhes os equipamentos utilizados na Montagem Experimental A.

Tabela 3.2 – Equipamentos utilizados na Montagem Experimental A.

<b>Equipamento</b>	<b>Fabricante/Modelo</b>	<b>Características</b>
Motor elétrico da bomba protótipo	WEG	Trifásico 220/380V, 13/7,53A, 60 Hz, 3,7 HP (5 CV), 3485 rpm.
Motor elétrico da bomba booster	WEG	Trifásico 220/380/440V, 13,8/7,99/6,90 A, 60 Hz, 3,7 HP (5 CV), 1730 rpm.
Bomba booster	KSB Meganorm Bloc, 40-250F	Simples estágio, rotor de 238 mm, vazão de 25 m <sup>3</sup> /h e elevação de 24 m, no BEP.
Variadores de frequência	WEG GFW-08	Trifásico 200-240V 3-19A, 60 Hz, micro processado com display digital.
Tanque	-	Tanque separador em polipropileno, volume de 0,5 m <sup>3</sup> .
Termochiller	Carrier AQUASNAP 30RH20	Capacidade de refrigeração 61,4 kW, aquecimento 62,5kW, temperatura do fluido de trabalho de 5 a 56 °C.
Trocador de calor	Casco-Tubo	Fabricação própria.
Válvula micrométrica	Festo GRP-10-PK-3	Vazão de precisão com retenção integrada para controle de vazão de gás.
Válvula globo	-	Controle manual de vazão de líquido.

### 3.2.2 Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados

Na Montagem Experimental A, são medidas todas as variáveis necessárias para determinar o desempenho da bomba protótipo. A seguir, são apresentados os detalhes da instrumentação e do sistema de aquisição de dados.

O ganho de pressão fornecido ao fluido é medido por meio de transdutores de pressão manométricos instalados na entrada e saída da bomba protótipo. Na entrada, o transdutor de pressão é instalado no tubo de sucção, após o ponto de injeção do gás. Já na saída,

a pressão é medida no estator por meio de um anel piezométrico que conecta, radialmente, diferentes pontos, promovendo uma melhor equalização da pressão.

Na entrada da bomba protótipo, também, é instalada uma termoresistência tipo PT100 para a medição da temperatura. Essa medição é utilizada como referência no controle de temperatura do fluido.

No eixo de acionamento da bomba protótipo é acoplado um torquímetro rotativo para medição do torque consumido pela bomba.

A vazão mássica do líquido é medida utilizando um medidor tipo Coriolis instalado na linha de sucção, antes do ponto de injeção do gás.

A vazão volumétrica de gás é obtida por meio de um laminador de fluxo. Esse instrumento fornece a vazão de forma indireta a partir da medição da pressão, temperatura e diferencial de pressão gerado pelo escoamento do gás através do laminador. A vazão volumétrica do gás, para o modelo de laminador utilizado, é dada por:

$$q_{G,LFE} = 1,4296311 \cdot 10^{-2} \Delta P_{LFE} - 4,5950282 \cdot 10^{-5} \Delta P_{LFE}^2 \quad (3.1)$$

onde  $q_{G,LFE}$  é a vazão volumétrica do gás em CFM e  $\Delta P_{LFE}$  é o diferencial de pressão através do laminador em inH<sub>2</sub>O.

A vazão mássica pode ser calculada a partir da vazão volumétrica, tal que:

$$\dot{m}_{G,LFE} = \rho_{LFE} q_{G,LFE} = 1,699011 \frac{P_{LFE}}{R_G T_{LFE}} q_{G,LFE} \quad (3.2)$$

onde  $\dot{m}_{G,LFE}$  é a vazão mássica de gás em kg/h,  $q_{G,LFE}$  é a vazão volumétrica do gás em CFM,  $P_{LFE}$  é a pressão absoluta no laminador em kPa,  $T_{LFE}$  é a temperatura absoluta do gás no laminador em K e  $R_G$  é a constante do gás kJ/kgK.

A Tabela 3.3 apresenta todas as variáveis medidas durante os experimentos e a Tabela 3.4 mostra a descrição dos instrumentos utilizados. No APÊNDICE B, são mostrados os procedimentos e as curvas de calibração dos instrumentos de medição. As incertezas associadas aos instrumentos e as variáveis de desempenho calculadas são apresentadas no APÊNDICE C.

O sistema de aquisição de dados é composto de um microcomputador, módulos de aquisição de sinais e programa de processamento. São utilizados dois módulos de aquisição



conforme os sinais de saída dos instrumentos, que são em corrente (4 – 20 mA) ou tensão ( $\pm 10$  volts). Nos módulos de aquisição, os sinais analógicos são recebidos dos instrumentos, condicionados e digitalizados.

Tabela 3.3 – Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados Montagem Experimental A.

Variável	Definição	Unidade
$P_1$	Pressão na sucção	kPa
$P_2$	Pressão na descarga	kPa
$P_{LFE}$	Pressão no elemento de fluxo laminar	kPa
$\Delta P_{LFE}$	Pressão diferencial no elemento de fluxo laminar	inH <sub>2</sub> O
$T_e$	Temperatura na sucção	°C
$T_{LFE}$	Temperatura na descarga	°C
$\dot{m}_L$	Vazão mássica de líquido	kg/h
$T_{eixo}$	Torque do motor	N.m
$\omega$	Rotação	rpm

Por meio do software LabView® 2011, foi desenvolvido um programa para monitorar toda a instrumentação. Na interface gráfica do programa, Figura 3.7, são mostrados, em tempo real, os sinais vindos dos instrumentos de medição e o comportamento das curvas de desempenho que estão sendo obtidas. Esses sinais são processados, apresentados ao usuário na forma de média ou gráficos e salvos em arquivos de texto com extensão txt.

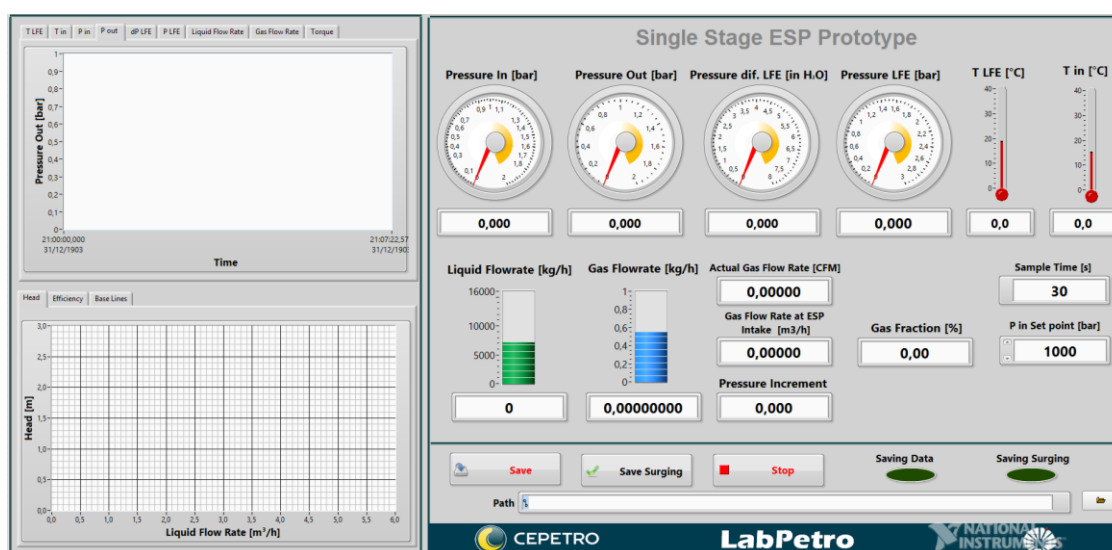


Figura 3.7 – Interface gráfica do programa de monitoramento e aquisição de dados.

Tabela 3.4 – Instrumentação utilizada na Montagem Experimental A.

Instrumento	Variável	Modelo	Características
Vazão mássica de líquido	$\dot{m}_L$	Micro Motion Modelo F100	Tipo Coriolis de 1”, sinal, saída analógica de 4 – 20 mA, operação 0 – 32650 kg/h.
Transdutor de pressão	$P_1$ $P_2$	Rosemount Modelo 2088	Medidor de pressão manométrica, calibração 0 – 2000 kPa, saída analógica de 4 – 20 mA.
Transdutor de pressão	$P_{LFE}$	Rosemount Modelo 1151 Smar	Medidor de pressão manométrica, calibração 0 – 300 kPa, saída analógica de 4 – 20 mA.
Transdutor de pressão	$\Delta P_{LFE}$	Rosemount Modelo 2051	Medidor de pressão diferencial, calibração 0 – 8 inH <sub>2</sub> O, saída analógica de 4 – 20 mA.
Sensor de temperatura	$T_e$ $T_{LFE}$	PT-100	Sensor de temperatura RTD com faixa de operação 0 – 100 °C.
Torquímetro	$T_{eixo}$	Omega Modelo TQ501-100	Sensor de torque e rotação com condicionador de sinais modelo, capacidade de 100 lbf.in e rotação máxima de 6000 rpm.
Tacômetro	$\omega$	MDT – 2238A	Digital foto/contato, operação de 2.4 – 99999 rpm ( <i>foto</i> ).
Elemento de fluxo laminar	Meriam Instruments Modelo Z50MJ10-14		Medidor de vazão de gás de fluxo laminar, faixa de operação 0-0,11142 CFM.
Transdutor de temperatura	ECIL APAQ-LR		Transmissor resistência/corrente saída analógica de 4 – 20 mA.
Aquisição de sinais	National Instruments NI USB 9162/9172		Chassis para módulo de aquisição de sinais com saída USB.
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9201		8 canais de entrada para sinais de $\pm 10$ Volts.
Módulo de aquisição de sinais	National Instruments NI 9203		8 canais de entrada para sinais de 4 – 20 mA.

### 3.2.3 Equipamentos de Visualização

A visualização do escoamento no interior do impelidor foi realizada utilizando-se a técnica de filmagem de alta velocidade. A câmera utilizada foi o modelo *I-Speed 3*, fabricada pela Olympus, que possui resolução máxima de 1280x1024 em taxas de aquisição de até 2000 fps. Na taxa de aquisição máxima de 150000 fps a resolução se reduz à 60x44.

A câmera possui sensor monocromático e memória de 16Gb, capaz de gravar 4,9 segundos em resolução máxima. Os vídeos são salvos na memória da câmera em formato HSV e, após transferidos para um computador, podem ser convertidos em sequências de imagens no formato JPG, utilizando o *software iSpeed Viewer*.

A taxa de aquisição e a velocidade do obturador são parâmetros importantes na filmagem de alta velocidade. A taxa de aquisição determina quantas imagens são adquiridas por segundo, enquanto a velocidade do obturador determina o tempo de exposição do sensor da câmera à luz. Para a visualização do escoamento no interior do impelidor, o critério de escolha da taxa de aquisição foi baseado na resolução da imagem. Para a obtenção de imagens de toda extensão do impelidor, foi necessária a utilização da resolução de 1280x1024, resultando em um limite de taxa de aquisição de 2000 fps. A velocidade do obturador depende da taxa de aquisição e, após ajuste iniciais, foram adotadas velocidades em torno de 80  $\mu$ s.

Outro parâmetro importante na aquisição de imagens de qualidade é a profundidade do foco. Esse parâmetro representa a faixa de distâncias ao longo do eixo óptico que o objeto pode se deslocar, sem que a nitidez seja perdida. A profundidade do foco depende da abertura do diafragma e da distância entre o objeto e a câmera. Como a distância entre a janela de visualização e a câmera é mantida constante, a abertura do diafragma e a profundidade do foco são ajustadas de forma a obter-se a maior nitidez possível das bolhas que escoam no interior dos canais do impelidor.

Como fonte de iluminação foram utilizados quatro refletores em LED de 120W de potência e 7600 lúmens, cada. A Figura 3.8 mostra o sistema de iluminação montado juntamente à câmera de alta velocidade.

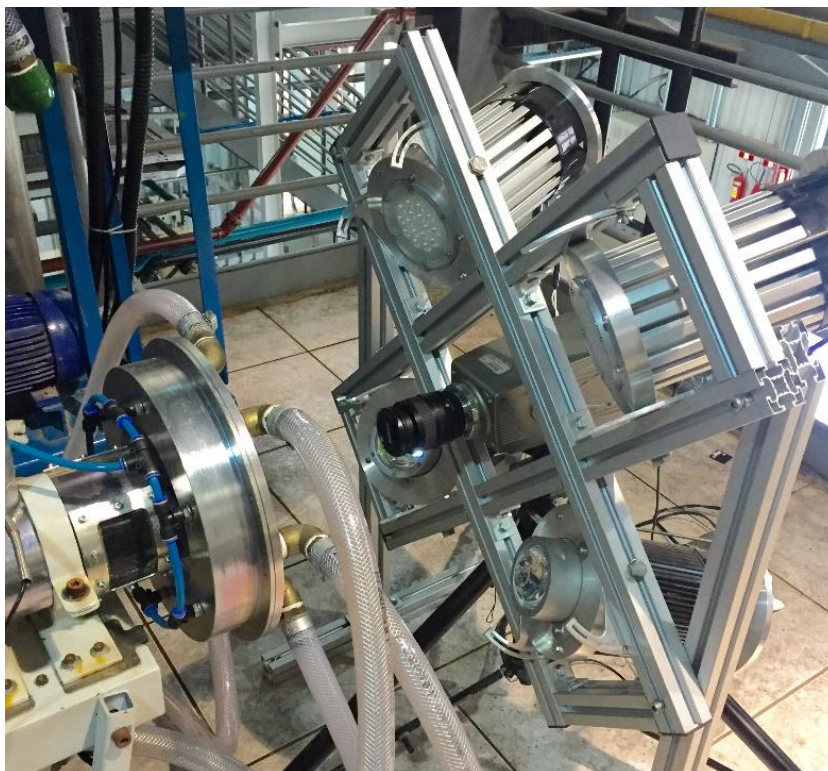


Figura 3.8 – Câmera de alta velocidade e sistema de iluminação.

### 3.2.3.1 Rotação das Imagens

Diferentemente dos trabalhos de Barrios (2007), Gamboa (2009) e Trevisan (2009) que focaram a visualização do escoamento em uma região específica do impelidor, este trabalho tem como objetivo visualizar toda sua extensão. Quando a imagem é focada em, apenas, uma região limitada, é possível a visualização de um determinado canal apenas enquanto ele passa por essa região de interesse. Dessa forma, fica impossível acompanhar a evolução do escoamento em um dado canal ou até mesmo verificar se todos os canais apresentam comportamento similar.

A técnica de rotação inversa das imagens permite uma melhor análise do escoamento em campos girantes. A rotação inversa das imagens tem um efeito equivalente a ter uma câmera que gira com a mesma rotação do impelidor. Um processamento numérico é feito de forma a rotacionar, em sentido contrário ao deslocamento do impelidor, cada imagem um certo ângulo específico. O ângulo que cada imagem deve ser rotacionado é função da velocidade angular do impelidor e da taxa de aquisição das imagens.

Para a aplicação desse processamento das imagens, é necessário que o centro da imagem esteja alinhado com o eixo de rotação da bomba e que a iluminação seja distribuída

uniformemente por todo impelidor. Após rotacionar toda sequência de imagens, a reprodução do vídeo resulta em um impelidor “estático”, em que o fluido escoar através dos canais.

### 3.2.4 Fluidos de Trabalho

Um dos objetivos deste estudo de visualização é avaliar a influência das propriedades dos fluidos nos padrões de escoamento gás-líquido nos canais do impelidor. Os testes experimentais foram realizados, utilizando-se três misturas distintas: água-ar, solução de água/glicerina-ar e solução de água/isopropanol-ar. A solução água/glicerina foi utilizada com o objetivo de investigar o efeito da viscosidade do líquido, enquanto a solução água/isopropanol foi empregada para variar a tensão superficial da mistura.

A seguir, é apresentada a caracterização das propriedades das soluções de água/glicerina e água/isopropanol.

#### 3.2.4.1 Solução Água/Glicerina

A solução de glicerina em água foi escolhida devido a acentuada variação da viscosidade em função da temperatura. Isso possibilita teste em diferentes viscosidades por meio do controle da temperatura da solução. Portanto, a caracterização das propriedades da solução é realizada na faixa operacional de temperatura na qual os testes serão realizados.

A reologia da solução foi determinada utilizando um reômetro rotacional (Thermoscientific Co., modelo Haake Mars III). Os estudos foram realizados utilizando a geometria cone-placa, sendo utilizado uma placa de 60 mm e cone com 1° de inclinação. O comportamento reológico da solução foi avaliado sob varredura de tensão de cisalhamento na faixa de  $10 - 500 \text{ s}^{-1}$ , nos limites operacionais de 5 e 40 °C. Os resultados da curva de fluxo da solução são apresentados na Figura 3.9. Os ajustes lineares dos dados medidos e os coeficientes de determinação  $R^2 \approx 1$ , revelam que a solução apresenta comportamento newtoniano nas temperaturas limites testadas.

A avaliação da variação da viscosidade em função da temperatura foi feita fixando a taxa de cisalhamento em  $10 \text{ s}^{-1}$  e variando a temperatura numa taxa decrescente de 0,4 °C/min de 40 até 5 °C. A Figura 3.10 mostra a variação da viscosidade em função da temperatura e o ajuste exponencial dos dados. Considerando-se os limites de temperatura de 5 a 40 °C, é possível obter-se a faixa de viscosidades de 90 a 10 cP, respectivamente.

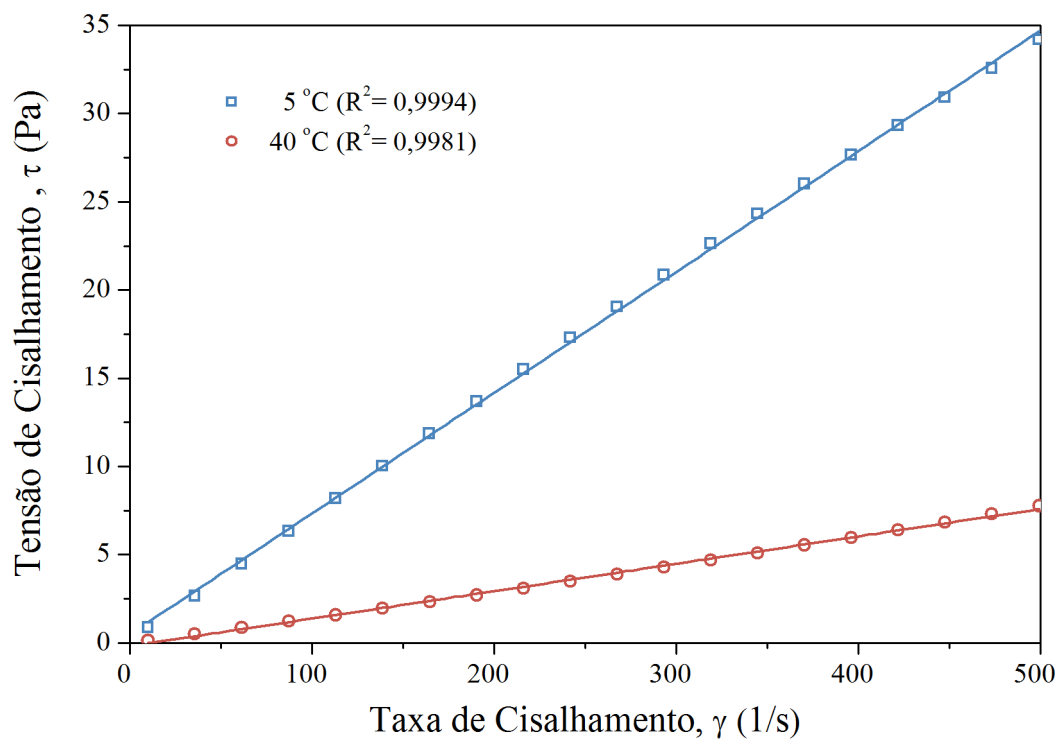


Figura 3.9 – Comportamento reológico da solução água/glicerina nas temperaturas de 5 e 40 °C.

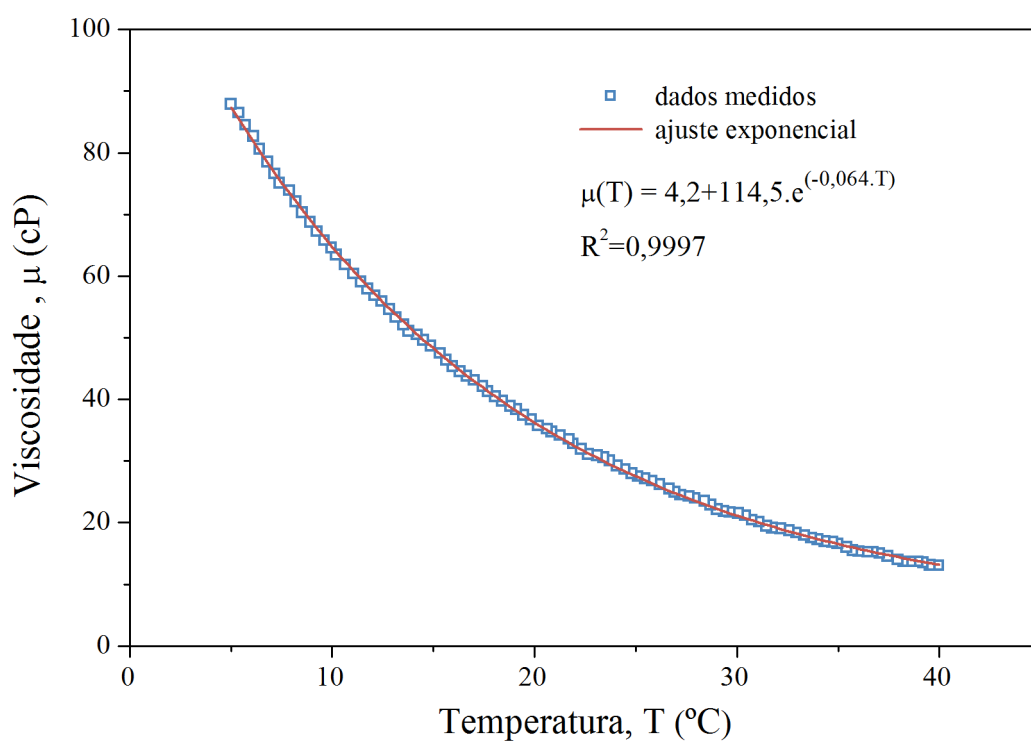


Figura 3.10 – Viscosidade em função da temperatura para solução água/glicerina.

A massa específica da solução água/glicerina foi medida por meio de um densímetro de tubo vibrante (Anton Paar, modelo DMA4500), com controle de temperatura da cela de medição por elemento Peltier. A Figura 3.11 mostra os valores medidos para a massa específica na faixa de temperatura de 5 a 40°C. Além dos dados medidos, é mostrado o ajuste linear da massa específica em função da temperatura e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

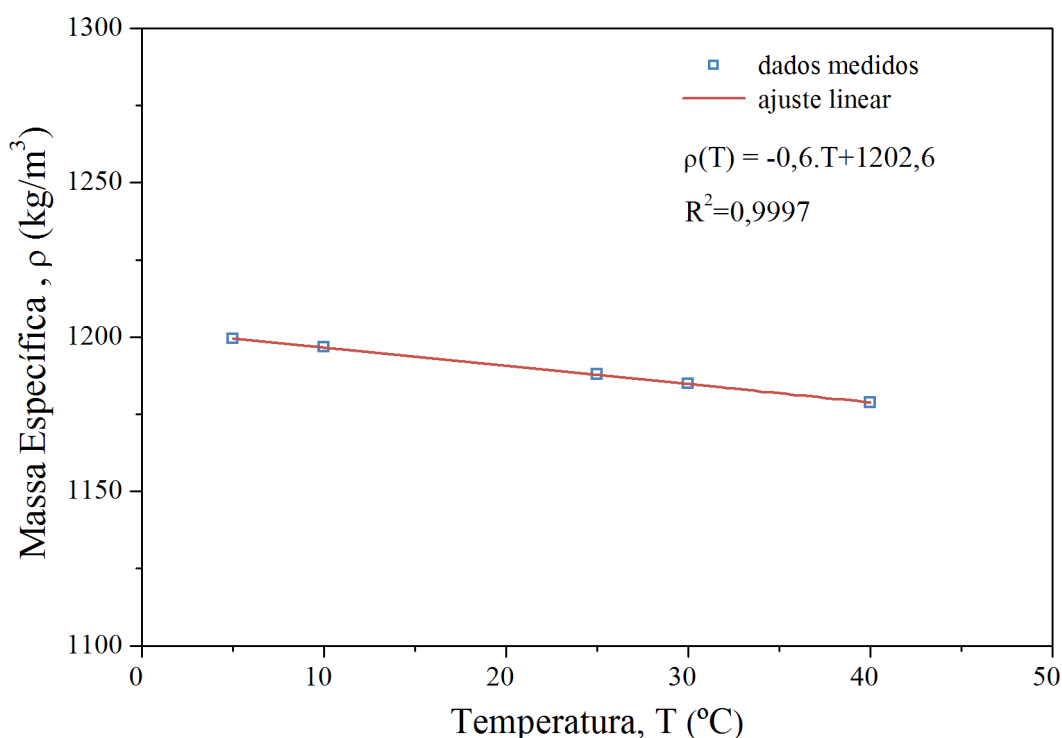


Figura 3.11 – Massa específica em função da temperatura para solução água/glicerina.

A tensão superficial entre a solução água/glicerina e o ar foi medida em um tensiômetro de gota pendente (Sinterface Tech, modelo PAT-1M). A metodologia de medição utilizada foi injetar o volume definido de 25  $\text{mm}^3$  por meio de uma agulha de 3mm de diâmetro, formando uma gota. A tensão superficial é obtida pela imagem do perfil da gota. A temperatura é controlada por um banho termostático. A Figura 3.12 mostra os valores medidos para a tensão superficial na faixa de temperatura de 5 a 40  $^{\circ}\text{C}$ , o ajuste linear e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

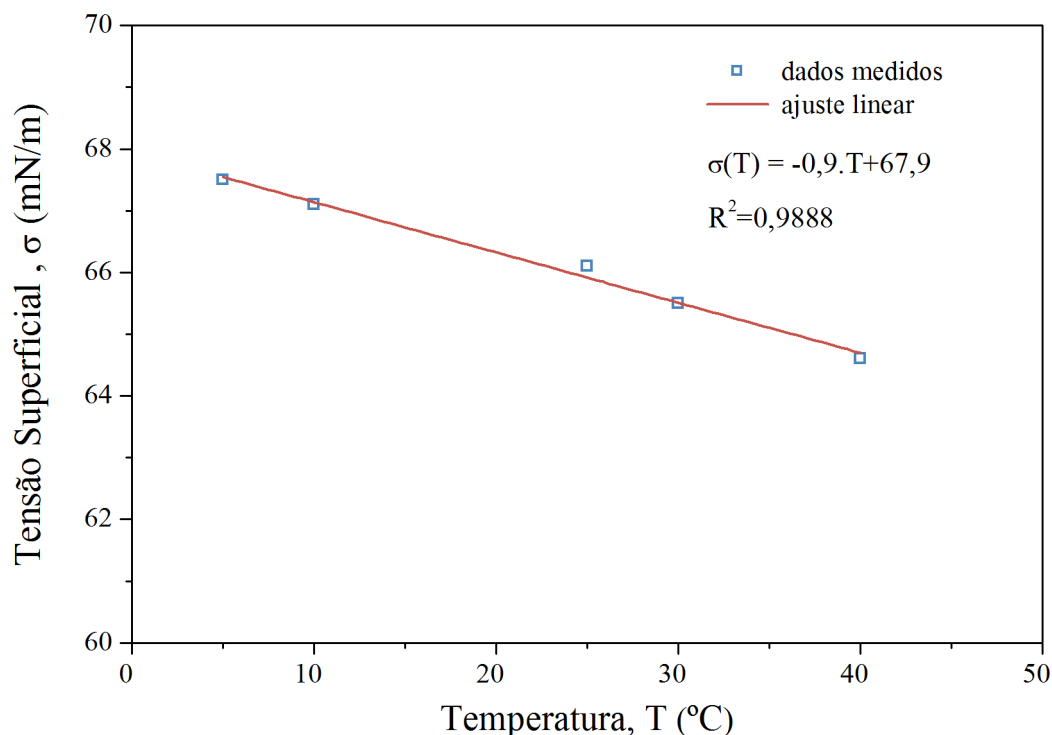


Figura 3.12 – Tensão superficial em função da temperatura para a solução água/glicerina e o ar.

### 3.2.4.2 Solução Água/Isopropanol

A utilização da solução de isopropanol em água teve como objetivo estudar os efeitos da tensão superficial no padrão de escoamento gás-líquido.

A proposta inicial era adicionar surfactante na água diminuindo a tensão superficial água/ar de 72 para 35 mN/m, valor próximo da propriedade para a mistura petróleo/gás natural, sem alterar de forma significativa a viscosidade. Alguns surfactantes poliméricos foram testados para esse propósito. No entanto, todos eles apresentaram um fator limitante para utilização. Durante a medição da tensão superficial no tensiômetro de gota pendente, foi observado um elevado tempo de estabilização da medida. Para algumas concentrações de polímeros, foram observados tempos superiores a 10 minutos para que a gota atingisse o equilíbrio. Esses resultados mostraram a existência de uma cinética de migração do surfactante para a superfície da gota. Como a passagem da mistura pela bomba acontece em frações de segundos e, conseqüentemente, não haveria o tempo de estabilização necessário, a utilização de surfactantes poliméricos foi descartada.

A solução encontrada foi a da mistura de isopropanol em água. O isopropanol ou álcool isopropílico, além de ser miscível em água, possui tensão superficial com o ar próxima



de 21 mN/m. Portanto, a tensão superficial da solução água/isopropanol diminui por efeito volumétrico, não havendo cinética de migração para a interface. A Figura 3.13 mostra a tensão superficial da solução água/isopropanol em função da fração mássica do álcool.

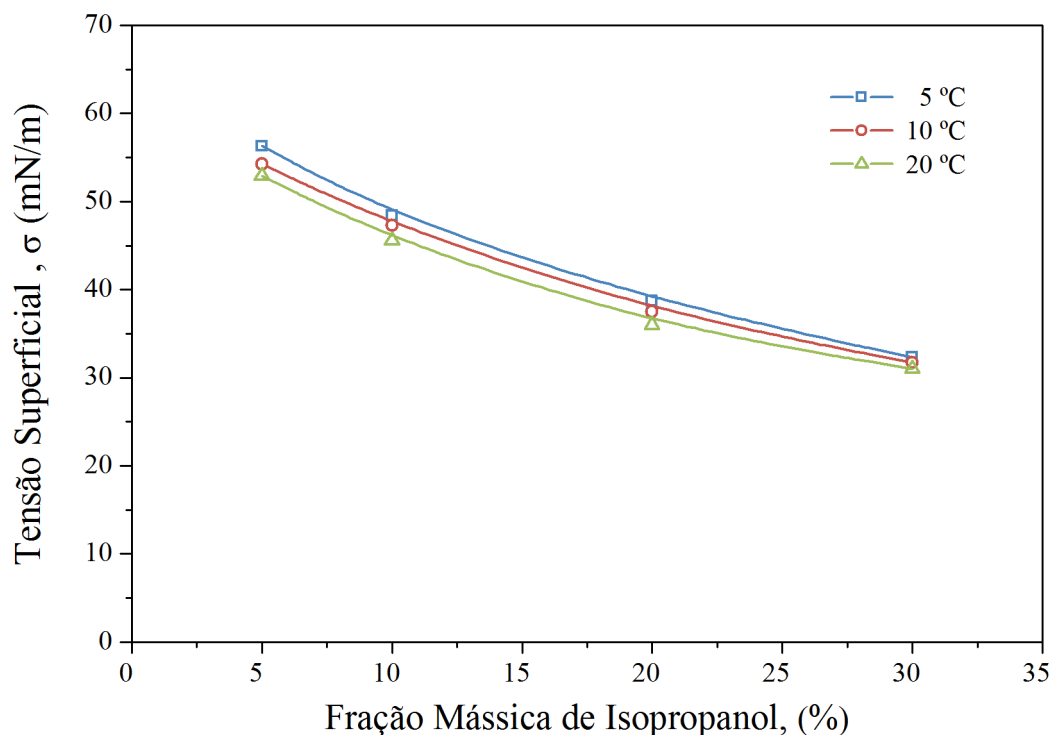


Figura 3.13 – Tensão superficial em função da fração mássica de isopropanol na solução.

Nos testes experimentais de visualização foram utilizadas soluções com três concentrações diferentes. A Tabela 3.5 apresenta as propriedades medidas das três soluções, denominadas como Fluido 1, 2 e 3. Essas propriedades foram medidas utilizando-se os mesmos procedimentos adotados para as análises da solução água/glicerina. A curva de fluxo da solução água/isopropanol apresenta ajuste linear, indicando que o fluido possui comportamento newtoniano. Os testes de visualização utilizando a mistura água/isopropanol foram realizados em temperaturas próximas de 10°C para evitar a vaporização do álcool.

Tabela 3.5 – Propriedades das soluções de água/isopropanol na temperatura de 10°C.

	Tensão Superficial [mN/m]	Massa Específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidade [cP]
<b>Fluido 1</b>	53,0	993,5	1,6
<b>Fluido 2</b>	43,0	986,5	2,2
<b>Fluido 3</b>	39,0	982,8	2,7

### 3.2.5 Procedimentos Experimentais

Os testes experimentais realizados têm como objetivo determinar os padrões de escoamento gás-líquido no interior do impelidor e relacioná-los com o desempenho da bomba protótipo. Os procedimentos experimentais adotados são apresentados a seguir, conforme o tipo de teste realizado.

#### 3.2.5.1 Testes de Desempenho com Escoamento Monofásico.

Embora o objetivo do trabalho seja investigar o desempenho do protótipo operando com misturas gás-líquido, os testes de desempenho monofásicos são fundamentais, pois são utilizados como referência para os demais resultados.

A seguir, é apresentado o procedimento adotado nos testes monofásicos realizados com água, solução de água/glicerina e solução de água/isopropanol.

1. Liga-se a bomba *booster* e, em seguida, a bomba protótipo. Fixa-se uma rotação para a bomba protótipo, por meio do variador de frequência, que permanecerá constante ao longo de todo o teste.
2. Liga-se a bomba de calor para aquecer ou resfriar o fluido conforme necessário. A vazão de líquido que passa pelo trocador de calor casco-tubo é ajustada pela abertura do *by-pass*. Espera-se o tempo necessário para que todo volume de líquido atinja a temperatura desejada, que é mantida constante durante todo o teste. O controle de temperatura é necessário nos testes com as soluções de água/glicerina e água/isopropanol.
3. Com a válvula globo totalmente aberta, ajusta-se uma rotação para a bomba *booster* de forma que o fluido chegue com pressão manométrica positiva na sucção da bomba protótipo e que a pressão gerada seja nula. Esse ponto corresponde à vazão máxima, ou condição operacional de altura de elevação nula. Essa condição operacional corresponde ao início do teste.
4. Esperam-se, aproximadamente, três minutos para que a condição operacional se estabilize.
5. Realiza-se a aquisição dos dados durante um intervalo de 30 segundos, com frequência de aquisição de 1kHz, totalizando uma amostra de 30000 medidas.

O *software* de aquisição calcula a média aritmética dessa amostra e realiza o armazenamento dos dados médios.

6. Para a próxima condição operacional, restringe-se o escoamento por meio do fechamento da válvula globo na linha de descarga até a vazão desejada. Repetem-se os procedimentos 4 e 5.

O procedimento 6 é realizado até que a condição de *shut-off* seja estabelecida. Nessas condições, a vazão é nula e a altura de elevação é máxima. A determinação de qual deve ser o fechamento da válvula e, conseqüentemente, redução da vazão, depende da discretização desejada para os resultados dos testes. Para ensaios monofásicos, são coletados em entre 20 a 50 pontos ao longo de toda a curva de desempenho, número superior aos 5 pontos recomendados pela norma API RP 11S2.

### 3.2.5.2 Testes de Desempenho com Escoamento Bifásico

Diferente dos testes de desempenho monofásicos que são normatizados, os testes bifásicos não possuem nenhuma recomendação. Nos estudos mostrados na revisão bibliográfica, cada autor define sua metodologia de testes, assim como a forma de apresentar as curvas de desempenho. Isso dificulta consideravelmente a comparação entre resultados de diferentes autores.

No presente trabalho, serão adotados dois procedimentos experimentais para os testes de desempenho bifásicos: teste a vazão de gás constante e teste a vazão de líquido constante. Esses dois procedimentos aparecem com recorrência na literatura, porém não são claras as informações fornecidas por cada teste ou se existe uma equivalência entre eles. Um dos objetivos dos testes de visualização utilizando esses dois procedimentos é, justamente, tentar correlacionar as informações fornecidas por cada um deles.

#### – Teste a vazão de gás constante

Esse tipo de procedimento é semelhante ao teste monofásico, porém com injeção contínua de gás. Durante o teste, são mantidos constantes a pressão de sucção, a vazão de gás e rotação, enquanto a vazão de líquido é diminuída gradativamente. O procedimento experimental consiste em:

1. Liga-se a bomba *booster* e, em seguida, a bomba protótipo. Fixa-se uma rotação para a bomba protótipo por meio do variador de frequência.

2. Liga-se a bomba de calor para aquecer ou resfriar o fluido conforme necessário. Espera-se o tempo necessário para que todo volume de líquido atinja a temperatura desejada, que é mantida constante durante todo o teste.
3. Ajusta-se a rotação da bomba *booster* e a abertura da válvula globo de forma a obter-se o ponto de vazão máxima de líquido e a pressão de sucção desejada.
4. Inicia-se a injeção de gás de forma a obter-se a vazão desejada. Essa vazão de gás é mantida constante durante todo teste.
5. Com rotação, temperatura, pressão de sucção e vazão de gás ajustados, esperam-se três minutos para que a condição operacional se estabilize.
6. Realiza-se a aquisição dos dados durante um intervalo de 30 segundos e a aquisição das imagens durante 1 segundo.
7. Para o ajuste da próxima condição operacional, diminui-se a rotação da bomba *booster* e a abertura da válvula, mantendo-se a pressão de sucção constante.

Os procedimentos 5, 6 e 7 são repetidos até que a menor vazão de líquido em que é possível controlar as variáveis de interesse.

– Teste a vazão de líquido constante

Esses testes são realizados mantendo-se a vazão de líquido constante, enquanto a vazão de gás aumenta progressivamente. Por meio dos ensaios monofásicos previamente realizados, determinam-se os pontos de melhor eficiência que servirão de referência para a realização destes ensaios. As vazões de líquido escolhidas para o teste são a do BEP e os limites operacionais de +20% e -20% do BEP. Além da vazão de líquido, também são mantidas constantes a pressão de sucção e a rotação da bomba protótipo.

O procedimento experimental consiste em:

1. Liga-se a bomba *booster* e, em seguida, a bomba protótipo. Fixa-se uma rotação para a bomba protótipo por meio do variador de frequência.
2. Liga-se a bomba de calor para aquecer ou resfriar o fluido conforme necessário. Espera-se o tempo necessário para que todo volume de líquido atinja a temperatura desejada, que é mantida constante durante todo o teste.
3. Ajusta-se a rotação da bomba *booster* e a abertura da válvula globo de forma a obter-se a vazão de líquido e a pressão de sucção desejadas. Com rotação,

temperatura, pressão de sucção e vazão de líquido ajustados, inicia-se o teste fazendo a aquisição primeiro ponto experimental monofásico.

4. Inicia-se a injeção de gás por meio da abertura da válvula de precisão até obter-se a vazão desejada. Quando o gás é injetado pode ocorrer a variação da pressão de sucção e vazão de líquido. Nesse caso, é necessário atuar na rotação da bomba *booster* e na válvula globo para reestabelecer as condições fixadas para o teste.
5. Com rotação, temperatura, pressão de sucção e vazão de líquido ajustados, espera-se três minutos para que a condição operacional se estabilize.
6. Realiza-se a aquisição dos dados durante um intervalo de 30 segundos e a aquisição das imagens durante 1 segundo.
7. Para o ajuste da próxima condição operacional, aumenta-se abertura da válvula de precisão até a vazão de gás desejada.

Os procedimentos 4 a 7 são repetidos até que não seja mais possível controlar as condições operacionais devido as instabilidades provocadas pelo gás.

### 3.2.6 Matriz de Testes

Inicialmente, uma série de testes preliminares foram realizados para definição dos limites operacionais. Por se tratar de uma bomba protótipo, projetada e construída para visualizar o escoamento no interior do impelidor, algumas limitações são impostas à operação. As pressões de sucção e, conseqüentemente, descarga são limitadas pela pressão máxima suportada pela janela de visualização em acrílico. O limite estabelecido para a pressão de sucção foi de 150 kPa. A rotação da bomba protótipo teve dois fatores limitantes. O primeiro deles é a rotação máxima suportada pelo selo de vedação e o segundo é a taxa de aquisição da câmera, para manter a máxima resolução. Analisando-se essas duas limitações, foi adotada a faixa operacional de rotação entre 600 e 1500 rpm.

Os testes iniciais foram realizados com escoamento monofásico de água, nas rotações de 600, 900, 1200 e 1500 rpm. Esses testes tiveram como objetivo o comissionamento da instrumentação, assim como a verificação as leis de similaridades aplicadas a bomba protótipo.

Os testes bifásicos água-ar seguindo o procedimento de vazão de gás constante foram realizados na rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazões de gás de 0,025, 0,050, 0,075, 0,100 e 0,125 kg/h.

Os testes bifásicos água-ar com vazão de líquido constante foram realizados na rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazão de líquido de 0,8.BEP, BEP e 1,2.BEP.

Ainda com a mistura água-ar, foi realizado um estudo do efeito da rotação no padrão de escoamento e no desempenho da bomba protótipo. Esses testes foram realizados com pressão de sucção de 150 kPa e as respectivas vazões de líquido no BEP as para rotações de 900, 1200 e 1500 rpm.

A vazão de BEP e os limites de 0,8.BEP e 1,2.BEP, para as rotações de 900, 1200 e 1500 rpm, são mostradas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Ponto de melhor eficiência e limites operacionais com água, nas rotações de 900, 1200 e 1500 rpm.

Rotação (rpm)	Vazão de Água (m <sup>3</sup> /h)		
	0,8.BEP	BEP	1,2.BEP
900	2,56	3,20	3,84
1200	3,40	4,26	5,11
1500	4,26	5,33	6,40

Os testes de desempenho monofásicos utilizando a solução água/glicerina foram realizados na rotação de 900 rpm e viscosidades de 13, 20, 32 e 50 cP. Essas viscosidades equivalem a temperatura da solução de 40, 30,9, 21,9 e 14,5 °C, respectivamente.

Os testes bifásicos com a solução água/glicerina-ar foram realizados na rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e procedimento de vazão de gás constante. A matriz completa de testes é mostrada na Tabela 3.7.

O estudo da influência da tensão superficial no arranjo entre as fases e no desempenho da bomba protótipo foi realizado por meio dos testes bifásicos utilizando a mistura água/isopropanol-ar. Testes iniciais monofásicos com os Fluidos 1, 2 e 3 (Tabela 3.5) foram conduzidos para a obtenção das curvas de referência na rotação de 900 rpm.

Tabela 3.7 – Matriz de testes bifásico com mistura água/glicerina-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ .

Viscosidade (cP)	Vazão de gás (kg/h)		
	0,0125	0,025	0,050
13	X	X	X
20	X	X	
32	X		
50	X		

Os testes bifásicos foram realizados utilizando os Fluidos 1, 2 e 3, pressão de sucção de 150 kPa, rotação de 900 rpm e vazões de gás de 0,025, 0,050, 0,075, 0,100 e 0,125 kg/h. Utilizando o procedimento de vazão de líquido constante, foram realizados testes com o Fluido 3 na rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazão de líquido referentes a 0,8.BEP, BEP e 1,2.BEP.

A matriz experimental proposta resulta em mais de 400 pontos experimentais para a operação bifásica da bomba protótipo. Em todos esses pontos, foi realizada a filmagem do escoamento, resultando em mais de 500 Gb de imagens

No ANEXO I, são apresentados os dados coletados em todos os testes da matriz experimental.

### 3.3 Resultados Experimentais e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos para a bomba protótipo. Inicialmente, são definidos os padrões de escoamento gás-líquido identificados no interior do impelidor. Em seguida, é estabelecida a relação entre os padrões de escoamento e o desempenho medido da bomba protótipo em diferentes condições operacionais.

#### 3.3.1 Padrões de Escoamento Gás-Líquido no Interior do Impelidor

Baseado nas imagens obtidas para os testes do protótipo com a mistura bifásica água-ar, foram identificados quatro padrões de escoamento no interior do impelidor: *Bubble Flow*, *Agglomerated Bubble Flow*, *Gas Pocket Flow* e *Segregated Flow*. A seguir, são apresentadas as características e descrições de cada padrão observado.

– *Bubble Flow*

O padrão *Bubble Flow* é observado, apenas, para quantidades de gás extremamente baixas e consiste de pequenas bolhas dispersas ao longo dos canais do impelidor. A Figura 3.14 apresenta uma imagem obtida para o padrão *Bubble Flow*. O Vídeo 1, ANEXO II, apresenta a reprodução de parte das imagens obtidas para o padrão de escoamento *Bubble Flow*.

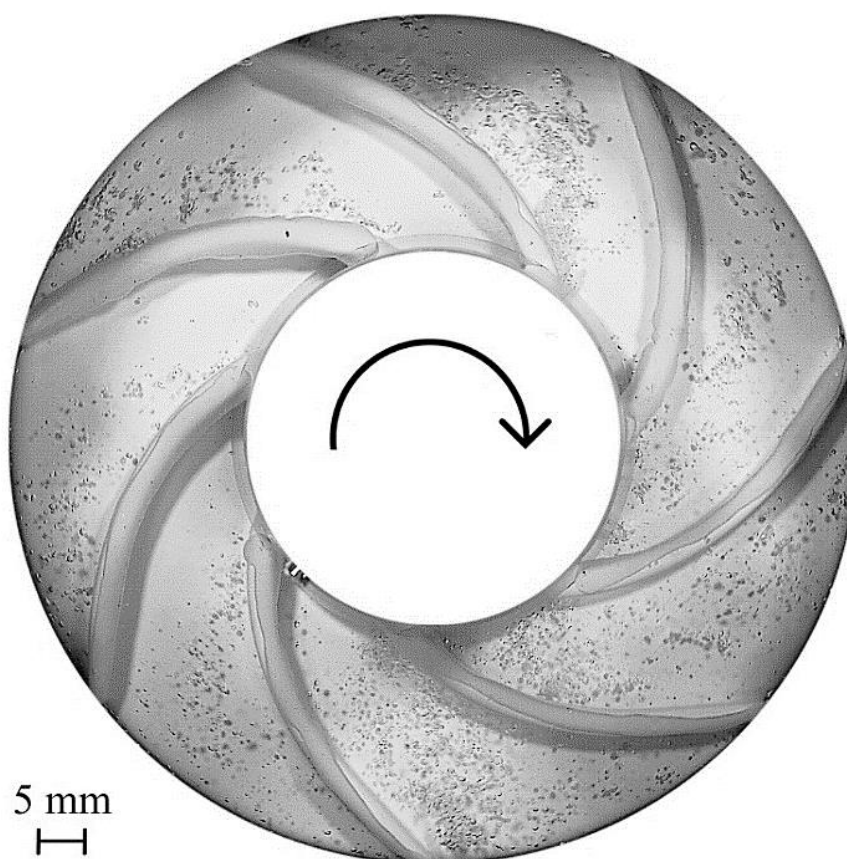


Figura 3.14 – Padrão de escoamento *Bubble Flow*.

No padrão *Bubble Flow*, a água é fase contínua e as bolhas de gás são a fase dispersa. A interação entre as bolhas de gás é pequena, não havendo aparente agregação da fase dispersa. As bolhas de gás seguem aproximadamente a mesma trajetória das partículas de água. As bolhas menores possuem formato esférico, enquanto as bolhas maiores apresentam um formato irregular. A vazão de gás influencia, principalmente, na quantidade de bolhas no interior do impelidor, enquanto o tamanho e o formato da bolha são determinados pela rotação e vazão de líquido. O tamanho das bolhas diminui com o aumento da rotação devido ao aumento da força de arrasto e da intensidade turbulenta.

Embora o campo centrífugo gerado pela rotação da bomba possua tendência de separar as fases, devido à diferença de densidade, a força de arrasto é suficiente para carrear o



gás juntamente ao líquido. Assim, não existe regiões de acúmulo de gás. O campo gravitacional, perpendicular ao eixo de rotação da bomba, não possui influência relevante no escoamento no interior do impelidor. Para a rotação de 900 rpm, o campo centrífugo é, aproximadamente, 45 vezes maior que o campo gravitacional. No entanto, o campo gravitacional influencia o escoamento no tubo de entrada da bomba onde é feita a mistura das fases, podendo alterar o arranjo das fases.

– *Agglomerated Bubble Flow*

Esse padrão de escoamento ocorre aumentando a fração de gás a partir do padrão *Bubble Flow*. Com o aumento da fração de gás a população de bolhas, também, aumenta, assim como o tamanho das bolhas. O espaçamento entre as bolhas diminui tornando a interação entre elas mais evidente. São observados aglomerações e dispersões de bolhas por todos os canais do impelidor. A Figura 3.15 ilustra o padrão *Agglomerated Bubble Flow*. O Vídeo 2, ANEXO II, apresenta a reprodução de parte das imagens obtidas para o padrão de escoamento *Agglomerated Bubble Flow*.

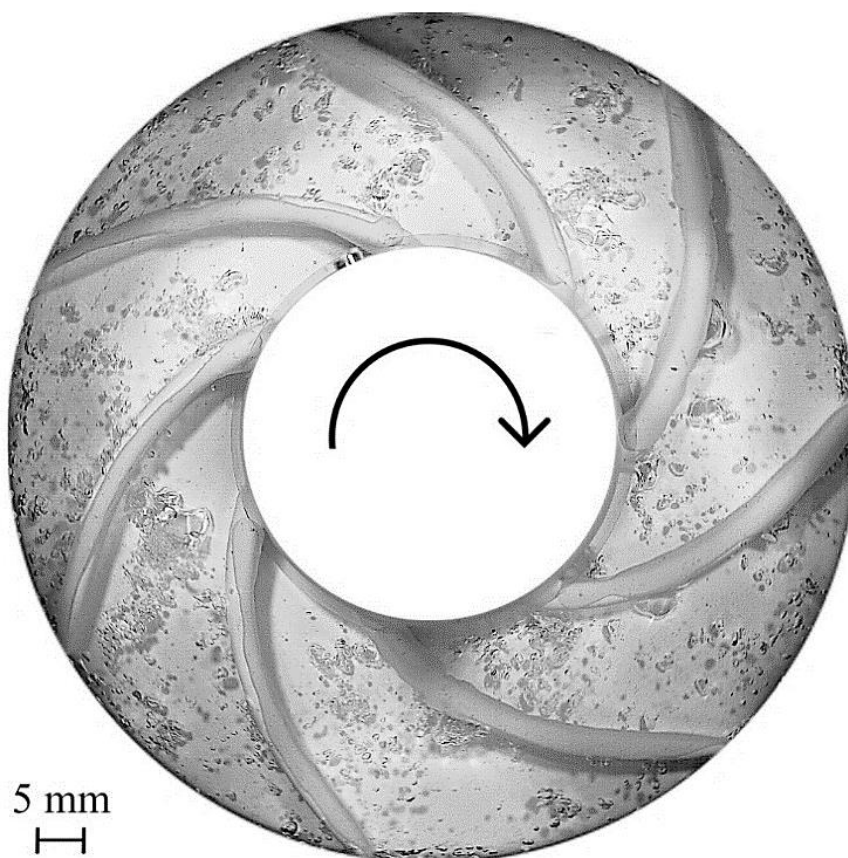


Figura 3.15 – Padrão de escoamento *Agglomerated Bubble Flow*.

As fases contínua e dispersa são a água e o ar, respectivamente. A maior interação da fase dispersa promove a aglomeração e coalescência de algumas bolhas, resultados em bolhas de diâmetro superior ao restante da população. As bolhas maiores formadas da coalescência têm formato indefinido e são intensamente deformadas pelo escoamento. A força de arrasto já não é suficiente para carrear essas bolhas deformáveis juntamente ao líquido. O gradiente de pressão adverso existente no interior do impelidor desacelera as bolhas de ar que tendem a ficar estacionárias dentro dos canais ou escoam com uma velocidade inferior à do líquido.

– *Gas Pocket Flow*

Com um incremento ainda maior na vazão de gás, observa-se que a coalescência das bolhas aumenta, resultando em uma grande bolha. Essa bolha de gás ocupa uma porção significativa do canal do impelidor restringindo a área disponível para o escoamento do líquido. A interface gás-líquido dessa estrutura gasosa é intensamente deformável e instável, indicando instabilidade do escoamento. A Figura 3.16 ilustra o escoamento no padrão *Gas Pocket Flow*. O Vídeo 3, ANEXO II, exemplifica o padrão de escoamento *Gas Pocket Flow*.

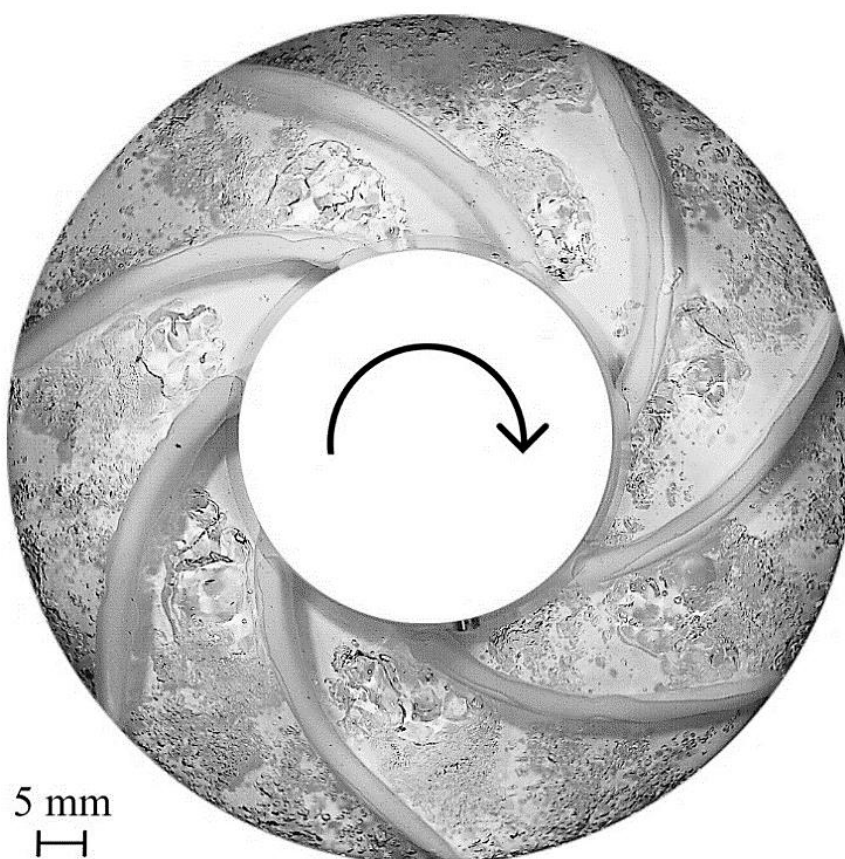


Figura 3.16 – Padrão de escoamento *Gas Pocket Flow*.

Observa-se, também, uma região de esteira a jusante da bolha estacionária. Essa região é caracterizada por um acúmulo de pequenas bolhas que se desprendem da estrutura maior e formam uma região de intensa recirculação.

O bloqueio de parte da área do impelidor pela bolha de gás reduz a transferência de energia cinética para o líquido, degradando a capacidade da bomba de gerar pressão, além de gerar instabilidade na operação da bomba. A instabilidade operacional devido a esse padrão de escoamento, é definida como *Surging*.

– *Segregated Flow*

Aumentando-se ainda mais a fração de gás as estruturas estacionárias, ou bolhas alongadas aumentam de tamanho na direção radial e passam a ocupar toda extensão do impelidor. As fases segregam-se e o gás passa a formar uma fase contínua. A Figura 3.17 ilustra o padrão *Segregated Flow*. O Vídeo 4, ANEXO II, reproduz imagens para o padrão de escoamento *Segregated Flow*.

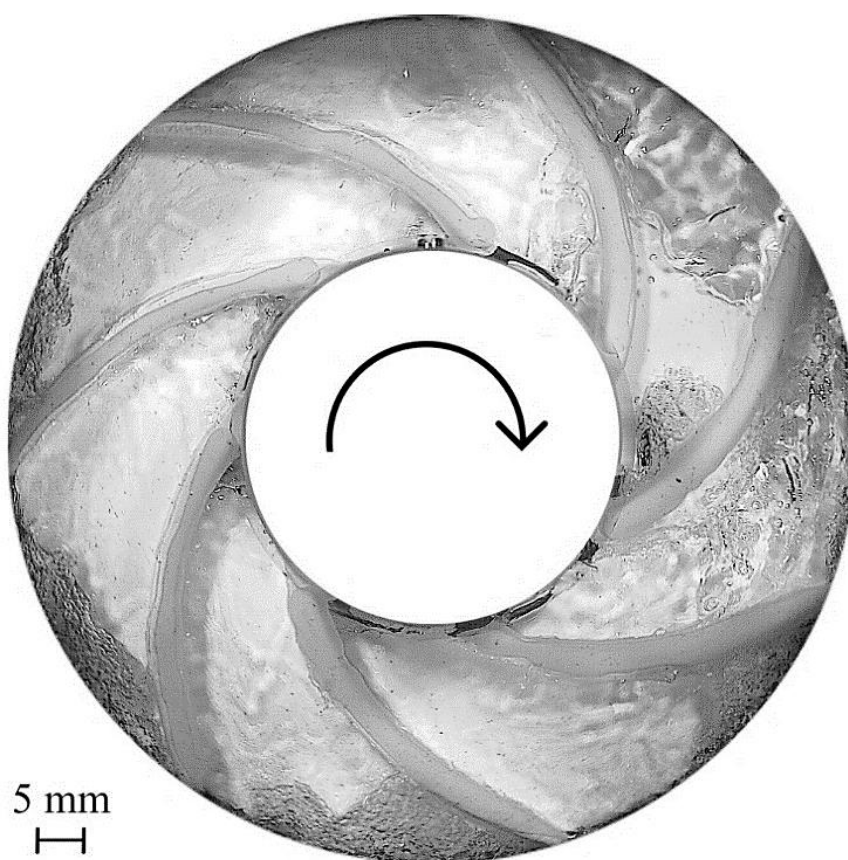


Figura 3.17 – Padrão de escoamento *Segregated Flow*.

A segregação do escoamento cria estruturas estacionárias de gás que ocupam desde a entrada do impelidor até a região de saída. Na região de entrada do canal do impelidor, observa-se uma região de coalescência de bolhas onde tem início a bolha alongada. Na região próxima à saída, ocorrem instabilidades a jusante da bolha alongada. Essas instabilidades promovem a quebra parcial da estrutura estacionária formando uma esteira de bolhas. As bolhas menores que se despendem tendem a ficar estacionárias dentro do impelidor, formando uma região com grande população e intensa recirculação. Nesse padrão de escoamento, são observadas ondas na interface gás-líquido, indicando a segregação do escoamento também no eixo axial do impelidor, conforme mostrado na Figura 3.18.

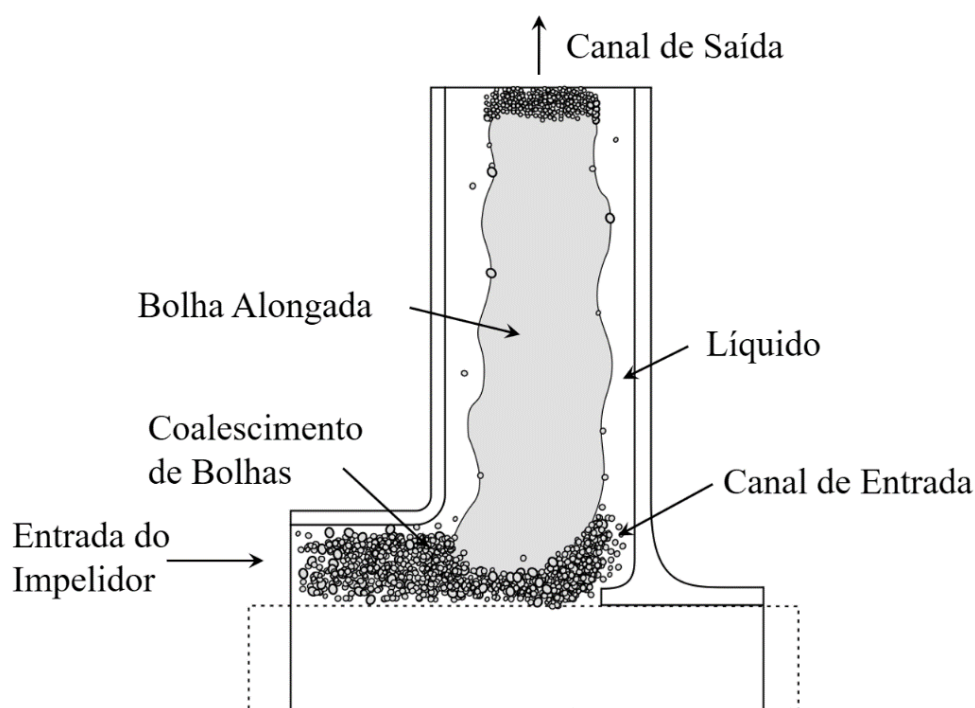


Figura 3.18 – Escoamento no interior do canal do impelidor para o padrão *Segregated Flow*.

Eventualmente, essas bolhas alongadas escoam para fora do impelidor dando lugar rapidamente a outra bolha alongada, porém sem aparente período definido.

A redução da área disponível ao escoamento do líquido torna a bomba incapaz de transferir energia ao fluido, resultando em uma altura de elevação praticamente nula. Essa condição operacional é descrita em aplicações práticas como *Gas Locking*. O *Gas Locking* é um problema operacional influenciado não somente pela bomba e sim por todo sistema de bombeamento. Nas aplicações em poços de petróleo, caso o reservatório não possua pressão

suficiente para promover o escoamento do fluido, a condição de *Gas Locking*, além de provocar uma elevação nula na bomba, também provocará uma vazão nula.

Baseados nas imagens obtidas experimentalmente para o escoamento gás-líquido no interior do impelidor, são propostas as ilustrações da Figura 3.19 para sintetizar os quatro padrões de escoamento verificados.

Independentemente do padrão de escoamento observado no interior do impelidor, o padrão gás-líquido na sucção do impelidor é o padrão bolhas. Assim, os padrões de escoamento dentro dos canais do impelidor são função, apenas, da hidrodinâmica do escoamento provocado pela bomba, não sendo influenciados nesse experimento pelo arranjo de fases na sucção.

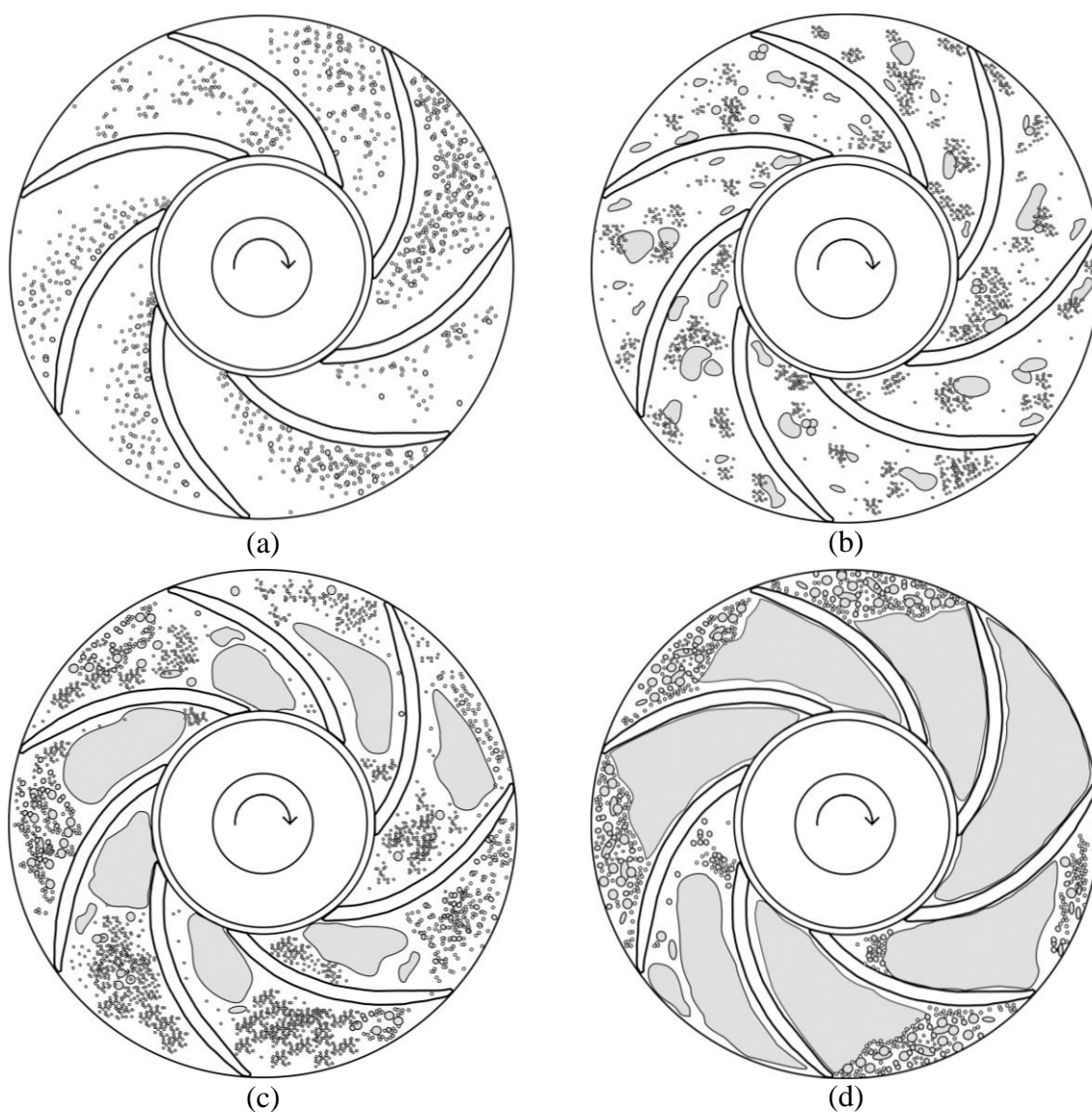


Figura 3.19 – Padrões de escoamento gás-líquido no impelidor BCS. (a) *Bubble Flow*, (b) *Agglomerated Bubble Flow*, (c) *Gas Pocket Flow*, (d) *Segregated Flow*.



### 3.3.1.1 Distribuição do Tamanho de Bolhas

Para o padrão *Bubble Flow*, foram avaliadas as dimensões das bolhas de gás. Neste trabalho é utilizada como dimensão característica das bolhas o diâmetro equivalente  $d_e$ . O diâmetro equivalente foi definido como sendo o diâmetro da esfera que possui a mesma razão entre o volume e a área superficial da bolha irregular. Todas as bolhas são consideradas com formato de esferoide prolato. O esferoide prolato é obtido por meio da rotação de uma elipse em torno de seu eixo maior ( $a$ ), Figura 3.20.

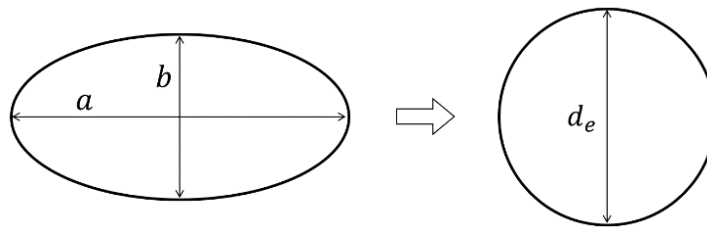


Figura 3.20 – Esferoide prolato e esfera de diâmetro equivalente

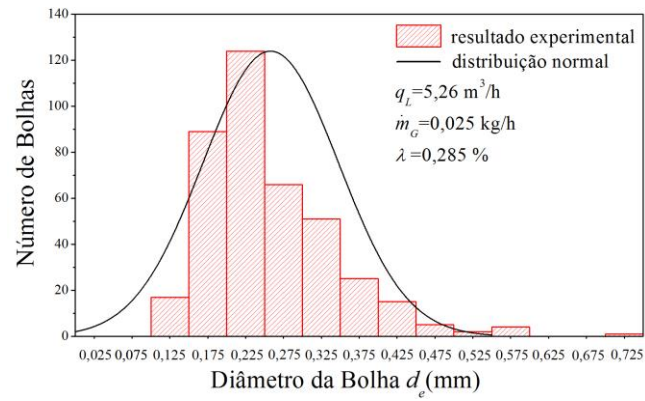
O diâmetro equivalente  $d_e$  é calculado pela Equação (3.3(3.3)).

$$d_e = \frac{\pi ab^2}{\frac{\pi b^2}{2} + \frac{\pi}{2} \frac{ab}{\sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}} \sin^{-1} \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]} \quad (3.3)$$

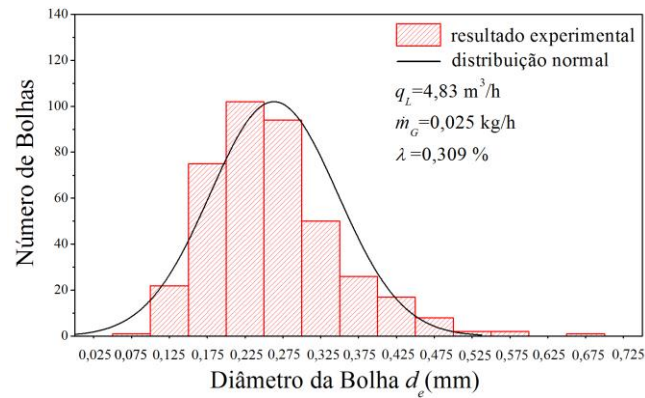
onde  $a$  e  $b$  são o eixo maior e menor do esferoide, respectivamente. Quando a bolha é esférica,  $a$  e  $b$  são iguais e a equação acima resulta em um diâmetro equivalente igual ao diâmetro original da bolha.

As imagens utilizadas para medição dos comprimentos  $a$  e  $b$  foram adquiridas com resolução de 1280x1024, taxa de 2000 fps, durante o tempo de 1 segundo. Em relação às 2000 imagens obtidas, foram escolhidas 5 de forma aleatória para serem analisadas. Em cada imagem, foram medidas 80 bolhas, totalizando uma população de 400 bolhas em determinada condição operacional.

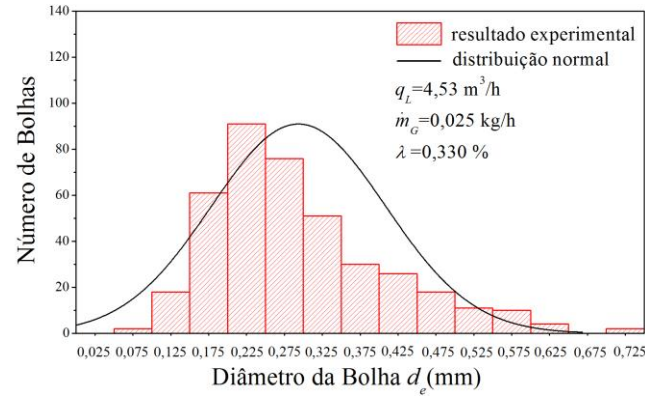
A Figura 3.21 apresenta os histogramas da distribuição do tamanho das bolhas e o ajuste da distribuição normal para quatro condições operacionais. As condições operacionais correspondem ao padrão *Bubble Flow*, rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazão mássica de gás de 0,025 kg/h. A fração volumétrica de gás  $\lambda$  aumenta do histograma (a) para o (d).



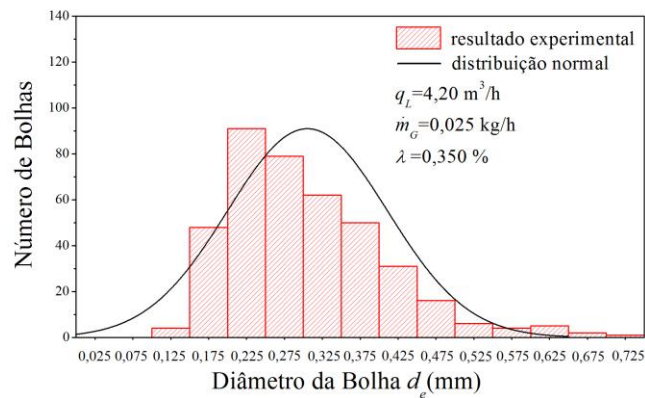
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.21 – Distribuição do tamanho das bolhas.

Embora o aumento da fração volumétrica de gás seja pequena, é possível verificar sua influência na distribuição do tamanho das bolhas. O incremento de  $\lambda$  tende a deslocar o pico da distribuição para direita, aumentando o diâmetro equivalente das bolhas. O pico de maior frequência diminui e os diâmetros maiores aparecem com maior frequência.

O aumento do diâmetro  $d_e$  em função da fração  $\lambda$  ocorre, principalmente, devido a maior ocorrência de bolhas não esféricas. O incremento de  $\lambda$  causa o aumento da quantidade de bolhas que apresentam a razão  $a/b$  maior que um. Enquanto a diminuição da  $\lambda$  está associado com uma maior população com razão  $a/b$  tendendo ao valor unitário.

Um comportamento inverso é observado com o aumento da rotação. Para uma mesma fração volumétrica, o aumento da rotação tende a deslocar a distribuição para a esquerda, diminuindo o diâmetro equivalente das bolhas. O pico de maior frequência aumenta, tornando as bolhas esféricas de pequeno diâmetro dominantes na população.

A condição operacional do histograma (d) é a fronteira do padrão *Bubble Flow*. Para frações gás ligeiramente superiores, surgem aglomerados de bolhas dando início ao padrão *Agglomerated Bubble Flow*. Nesse padrão o formato da bolha é irregular, sendo difícil definir uma dimensão característica da bolha. Portanto, a análise da distribuição do tamanho das bolhas fica limitado ao padrão *Bubble Flow*.

O diâmetro das bolhas é de fundamental importância para a aplicação do balanço de forças. A força de arrasto, uma das principais forças envolvidas, é diretamente relacionada ao diâmetro de bolha.

### **3.3.2 Relação Entre Padrão de Escoamento e Desempenho da Bomba Protótipo**

#### **3.3.2.1 Testes de Desempenho com Escoamento Monofásico de Água**

A Figura 3.22 apresenta os resultados de desempenho da bomba protótipo operando com água nas rotações de 600, 900, 1200 e 1500 rpm. Na Figura 3.23, esses resultados são apresentados na forma adimensional, assim como a comparação com o desempenho do estágio original da BCS P23.



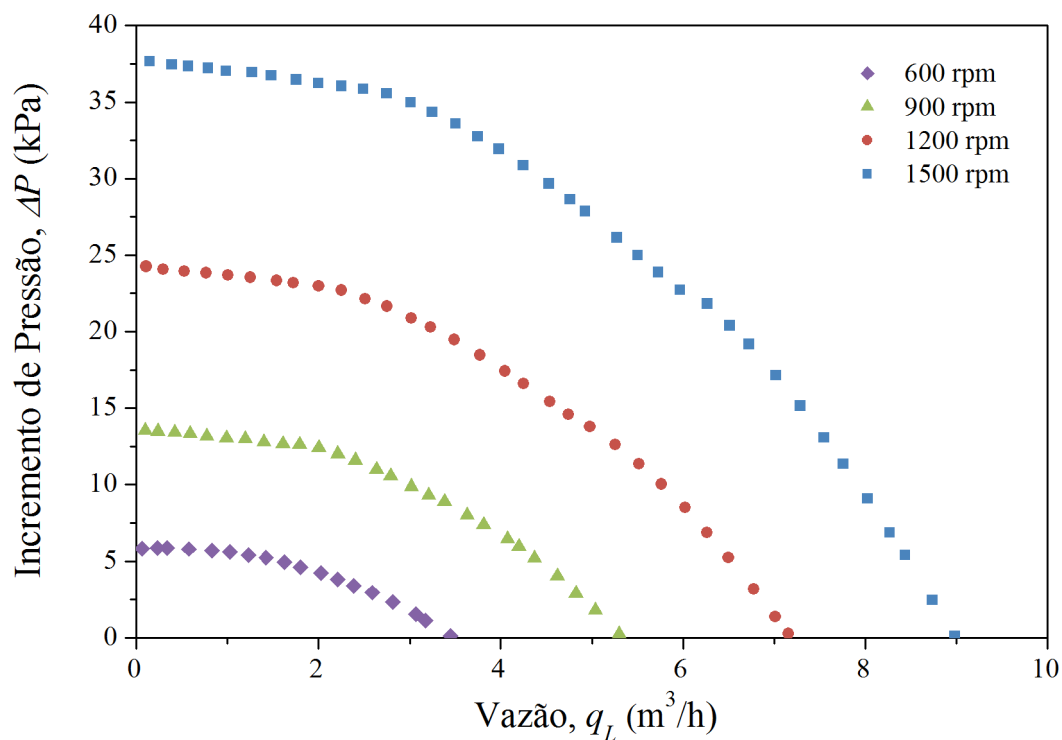


Figura 3.22 – Desempenho da bomba protótipo operando com escoamento monofásico de água nas rotações de 600, 900, 1200 e 1500 rpm.

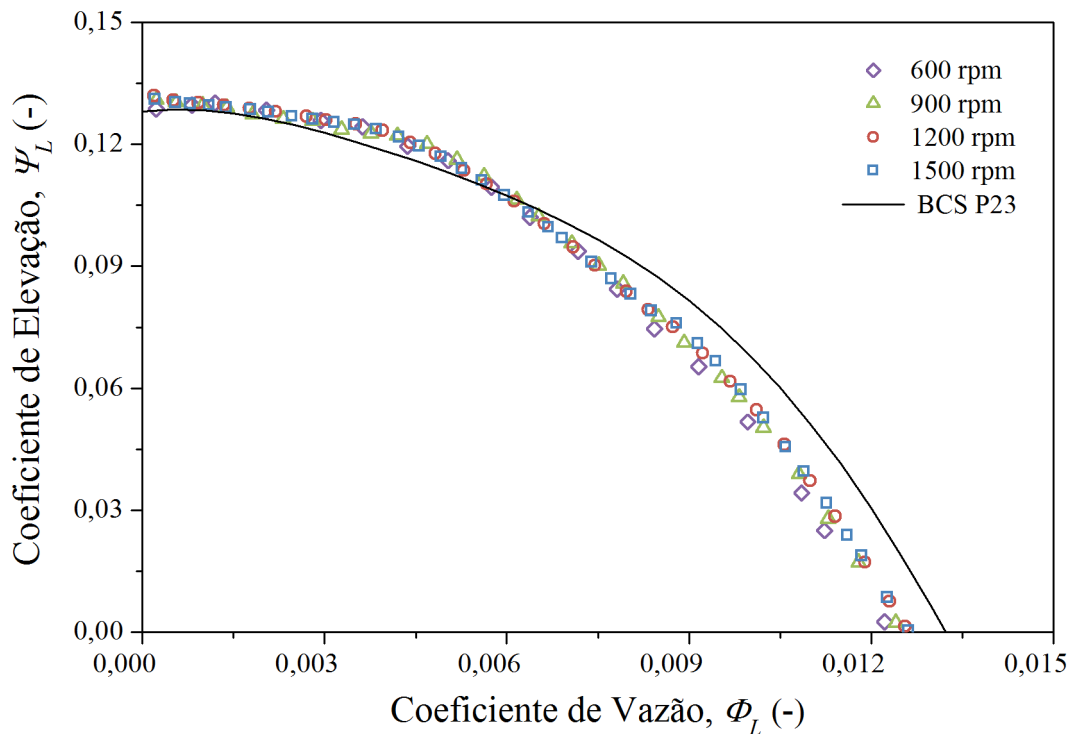


Figura 3.23 – Desempenho adimensional da bomba protótipo operando com escoamento monofásico de água em comparação com o desempenho da BCS P23.

Com base nesses resultados, observa-se que os desempenhos da bomba protótipo descrevem a mesma curva independente da rotação. Isso indica que as leis de similaridade são válidas e os efeitos viscosos são depressíveis comparados aos efeitos do campo centrífugo em rotações superiores a 600 rpm. Por essa razão, os testes bifásicos foram realizados em rotações acima de 600 rpm.

A comparação entre o desempenho da bomba protótipo e o desempenho do estágio original da BCS P23 apresentam boa concordância. Isso indica que as modificações realizadas no estator de saída e no acabamento superficial do impelidor não alteraram de forma significativa as características originais da BCS P23.

Além da análise utilizando os adimensionais, testes de repetibilidade também foram realizados para garantir a correta operação da bomba protótipo após as modificações.

No entanto, a análise das curvas dos coeficientes de potência e eficiência em função do coeficiente de vazão não mostraram a mesma coerência dos resultados apresentada na Figura 3.23. Isso indica que perdas mecânicas consumiram potências distintas em função das condições operacionais. Isso pode ser explicado pela vedação utilizando o selo mecânico de faces. Devido ao eixo flutuante, a força normal entre as faces do selo é função da pressão de sucção e da pressão gerada pela bomba, ou seja, não é constante ao longo da curva de desempenho e nem em diferentes rotações. Portanto, devido aos coeficientes de potência e eficiência não respeitarem as leis de similaridade, os resultados de BHP não serão considerados nesse trabalho.

### **3.3.2.2 Testes de Desempenho com Escoamento Bifásico Água-Ar**

#### **– *Teste a vazão de gás constante***

A Figura 3.24 apresenta a curva de desempenho da bomba protótipo operando com a mistura bifásica água-ar em um teste a vazão gás constante. As condições operacionais foram: rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazão mássica de gás de 0,050 kg/h. A curva de desempenho monofásico com água também é apresentada como referência. Os pontos experimentais de desempenho bifásicos são identificados de IM1 até IM11. A visualização do padrão de escoamento referente a cada um desses pontos é mostrada na Figura 3.25 e do Vídeo 5 até o Vídeo 15.

Durante todo o teste, verificou-se que o padrão de escoamento na sucção da bomba era o padrão bolhas. No início da curva de desempenho, IM1 a IM3, observa-se que a

performance da bomba praticamente não se altera quando comparada a operação monofásico. Nessas condições o padrão de escoamento no interior do impelidor é o *Bubble Flow*. As bolhas de gás dispersas escoam seguindo uma trajetória próxima as partículas de líquido sem apresentarem tendência de acúmulo. Não há influência significativa na transferência de energia da bomba para a mistura.

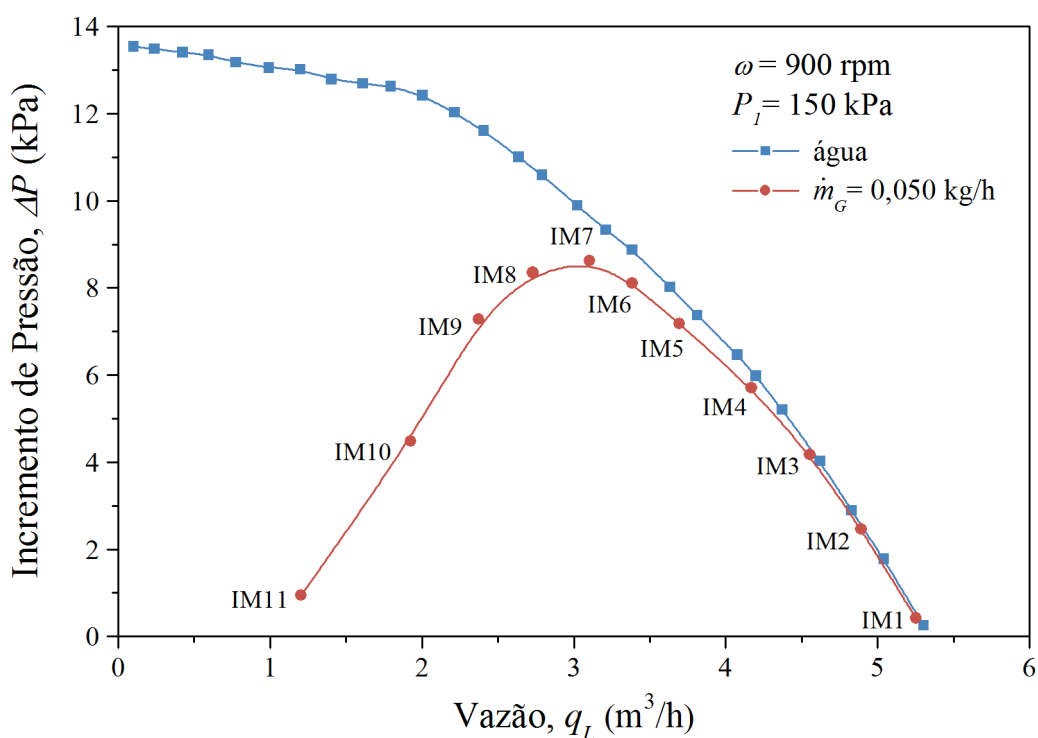
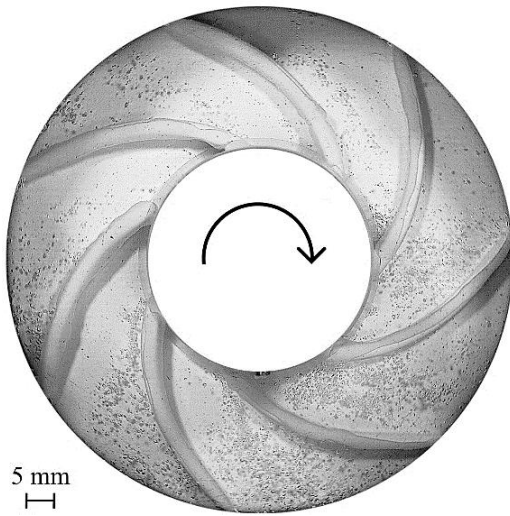
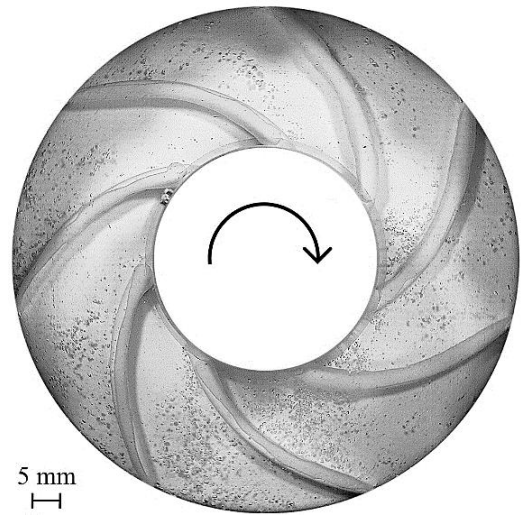
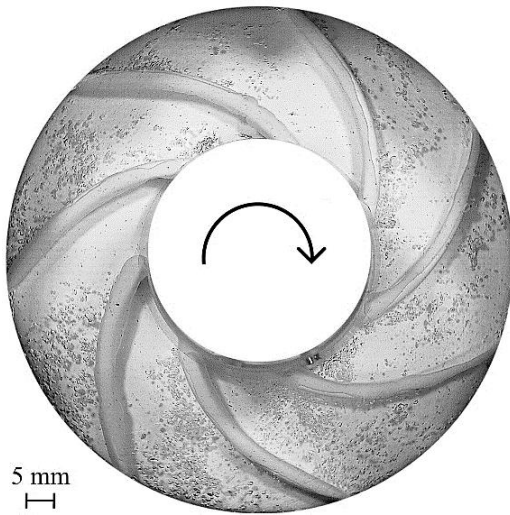
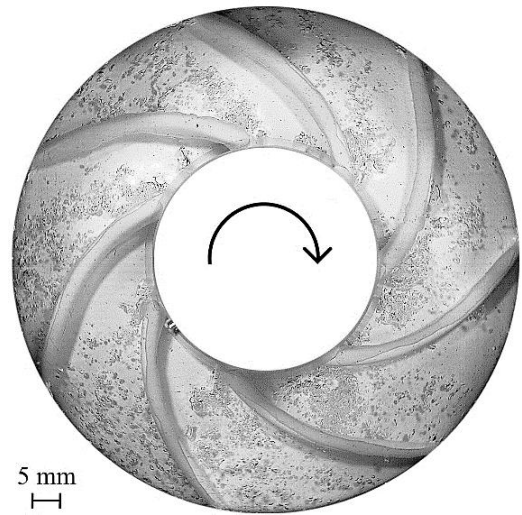
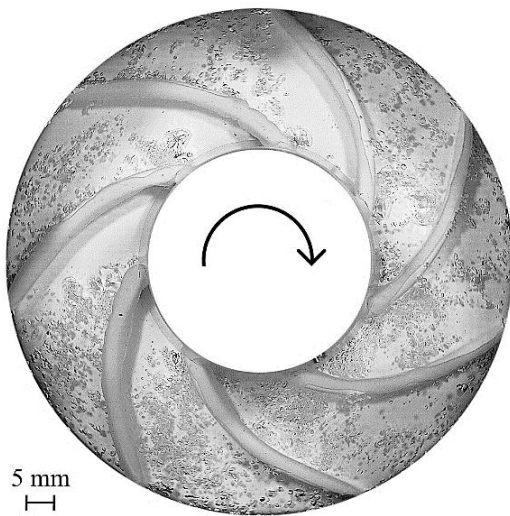
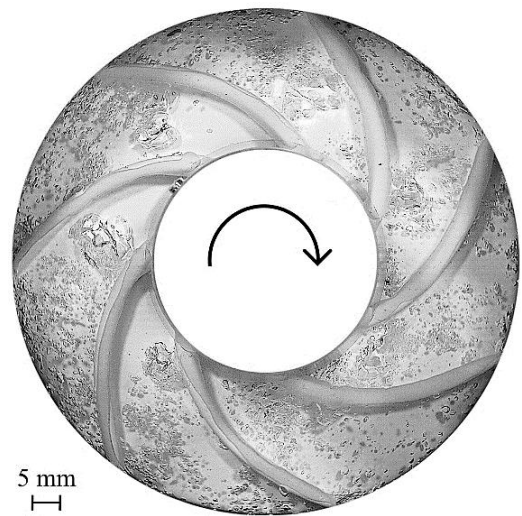


Figura 3.24 – Desempenho da bomba protótipo operando com mistura bifásica água-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$

Nos pontos IM4 e IM5, tem início a degradação do desempenho da bomba. A bomba começa a ter sua capacidade de gerar pressão afetada. O padrão de escoamento nessas condições é classificado como *Agglomerated Bubble Flow*. A população de bolhas é maior, assim como a interação entre elas. São verificados vestígios iniciais de acúmulo de gás no interior do impelidor.

A degradação do desempenho da bomba intensifica-se nos pontos IM6 a IM8. A curva de desempenho, que até então apresentava uma derivada negativa, passa por um ponto de máximo, IM7, e muda de tendência. O ponto de máximo introduz instabilidades na operação do sistema de bombeamento. A curva de pressão requerida do sistema pode cruzar a curva de desempenho da bomba em dois pontos, causando, assim, as instabilidades.

IM1,  $\lambda=0,57\%$ IM2,  $\lambda=0,61\%$ IM3,  $\lambda=0,65\%$ IM4,  $\lambda=0,73\%$ IM5,  $\lambda=0,83\%$ IM6,  $\lambda=0,89\%$

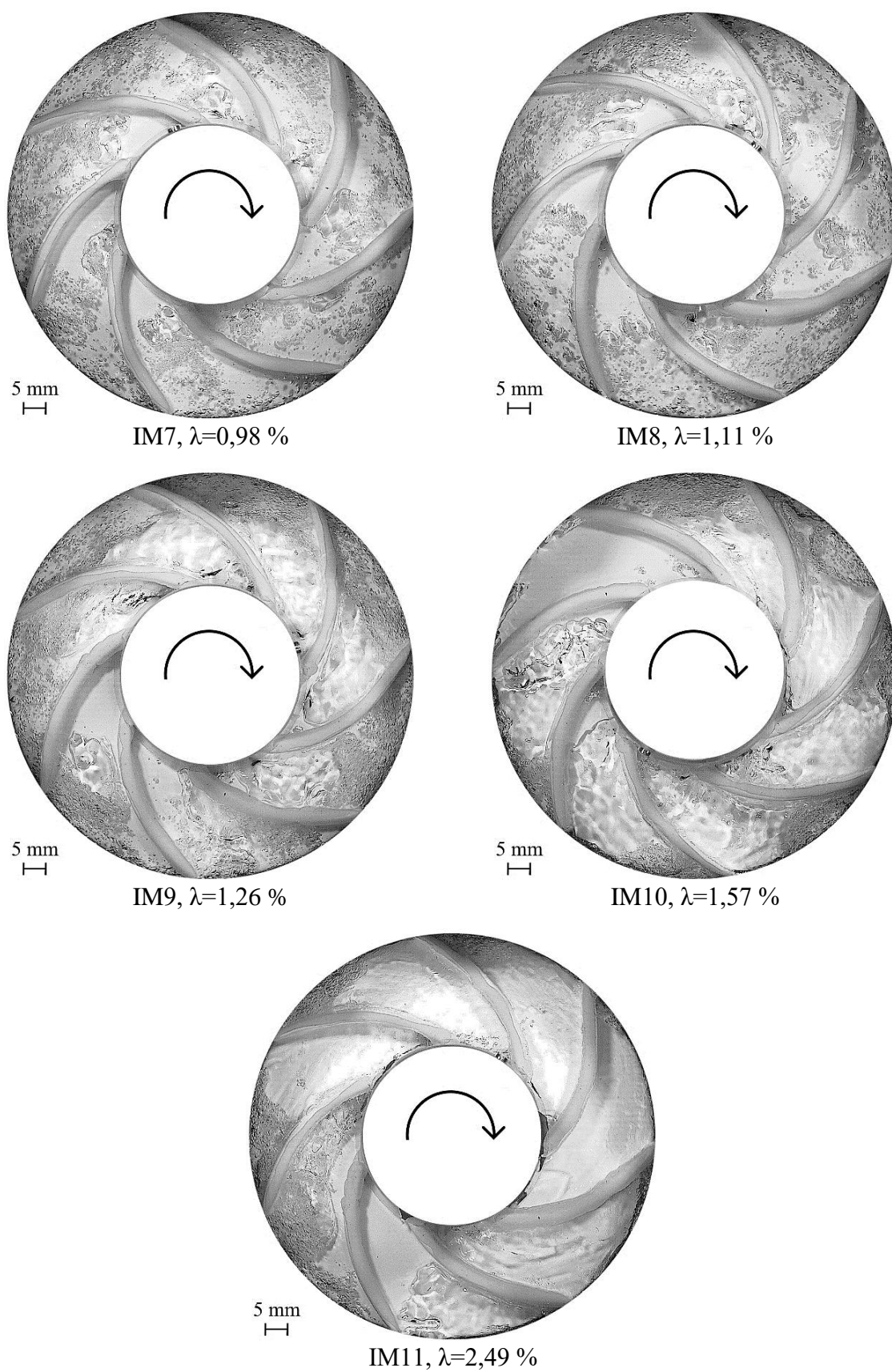


Figura 3.25 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ .

A instabilidade operacional é caracterizada por oscilações cíclicas na pressão e na potência consumida pelo motor elétrico que aciona a bomba protótipo. Essa instabilidade que ocorre em torno do ponto de máximo da curva de desempenho é definida como *Surging*. O padrão de escoamento relacionado à intensificação da degradação de desempenho e a introdução de instabilidades é o *Gas Pocket Flow*.

Após a ocorrência do ponto de máximo na curva de desempenho, a capacidade da bomba de gerar pressão cai bruscamente, IM9 a IM11. Na condição operacional do ponto IM11, o diferencial de pressão através da bomba é praticamente nulo. A bomba permanece com rotação constante, recebendo potência de eixo, porém é incapaz de transferir energia a mistura. Esse fenômeno é definido como *Gas Locking*.

Embora o diferencial de pressão seja nulo, a vazão de líquido é diferente de zero. Isso ocorre, pois, a bomba *booster* é responsável por manter a pressão de sucção da bomba constante. Esse diferencial de pressão é responsável por manter o fluxo de líquido.

O padrão de escoamento nos pontos IM9 a IM11 é o *Segregated Flow*. A fase gasosa torna-se contínua provocando a segregação do escoamento. A maior parte do canal do impelidor é ocupado pelo gás. Embora a fração volumétrica de gás  $\lambda$  no ponto IM11 seja pequena, aproximadamente 2,5%, a fração de vazio local  $\alpha$  é elevada. Isso ocorre devido à diferença entre as velocidades das fases. A bolha alongada de gás tende a ficar estacionária dentro do impelidor ocupando a maior parte da seção transversal do canal.

A Figura 3.26 mostra o desempenho da bomba operando com diferentes vazões de gás, rotação de 900 rpm e pressão de sucção de 150 kPa. Por meio da visualização do escoamento nessas condições operacionais, é possível delimitar a região da curva de desempenho em que ocorre cada padrão de escoamento. As análises feitas para a Figura 3.24 são válidas, também, para vazões mássicas de gás diferentes, podendo serem aplicadas a Figura 3.26.

As linhas tracejadas na Figura 3.26 indicam a transição entre os padrões de escoamento no interior do impelidor. A linha tracejada I indica a transição *Bubble Flow-Agglomerated Bubble Flow*. A linha II indica a transição *Agglomerated Bubble Flow-Gas Pocket Flow*. Finalmente, a linha III representa transição *Gas Pocket Flow-Segregated Flow*.

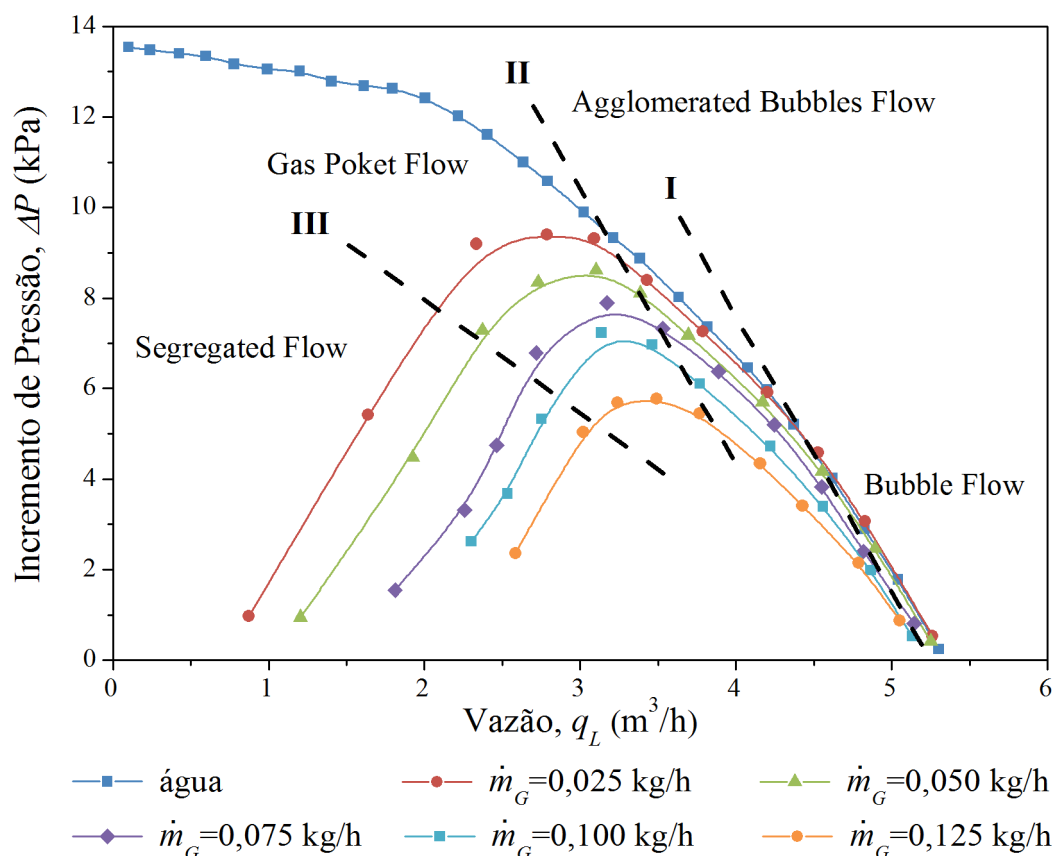


Figura 3.26 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica água-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e diferentes vazões mássicas de gás.

– Teste a vazão de líquido constante

A Figura 3.27 apresenta o resultado do teste de desempenho com vazão de líquido de  $3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ , rotação de  $900 \text{ rpm}$  e pressão de sucção de  $150 \text{ kPa}$ . A vazão de líquido testada refere-se ao ponto de melhor desempenho da bomba operando com água. Nessa figura é apresentado, também, o desempenho previsto da bomba considerando o modelo homogêneo, Equação (2.64). A visualização do padrão de escoamento referente aos pontos IM12 a IM17 é mostrada na Figura 3.28 e no Vídeo 16 até no Vídeo 21.

O resultado da Figura 3.27 mostra que o aumento da fração volumétrica de gás provoca uma tendência de redução do incremento de pressão gerado pela bomba. A intensidade da redução é distinta para valores diferentes de  $\lambda$  e tem relação direta com o padrão de escoamento no interior do impelidor. Para frações de gás inferiores a  $1,5\%$ , a taxa de redução do desempenho em função a fração de gás é constante. O padrão de escoamento é o *Agglomerated Bubble Flow*. A partir dessa fração de gás, observa-se uma variação na taxa de redução do desempenho da bomba. O incremento de pressão começa a diminuir bruscamente e

o padrão *Gas Pocket Flow* pode ser observado no interior dos canais do impelidor. A partir do ponto IM16, passa a ser observado o padrão *Segregated Flow*. A bomba continua apresentando um decréscimo na capacidade de bombeamento até o ponto IM17, em que o incremento de pressão é praticamente nulo.

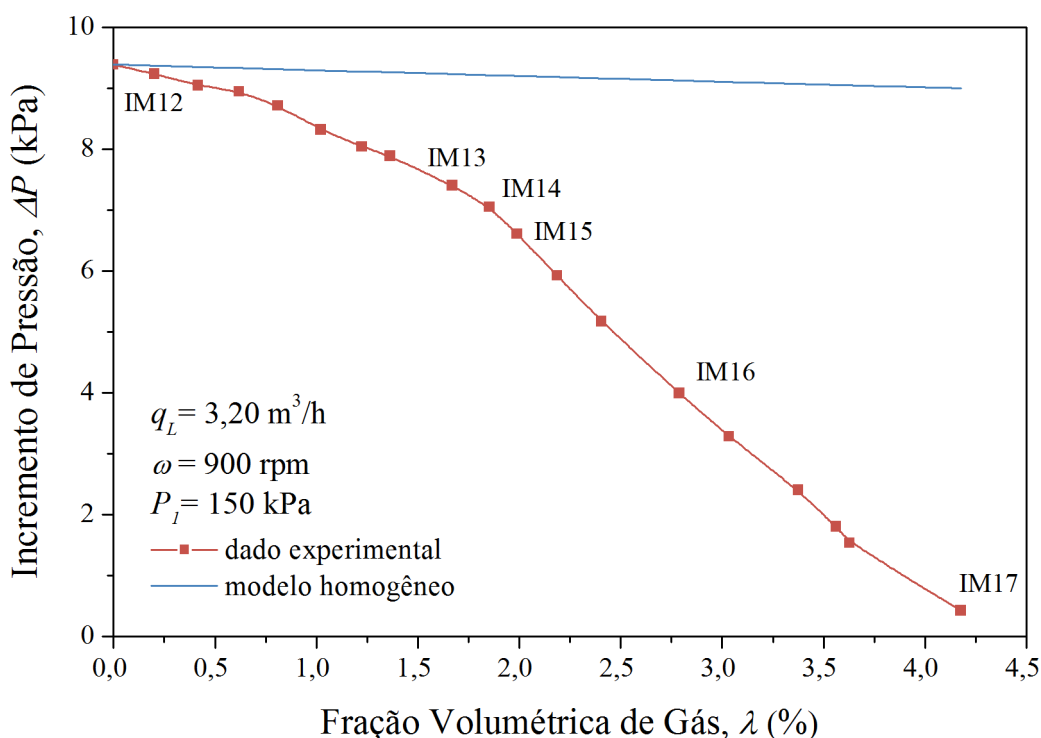


Figura 3.27 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica no teste de vazão de líquido constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ .

O desempenho medido da bomba e o previsto pelo modelo homogêneo são próximos apenas para valores de  $\lambda$  menores que 0,2%. Acima desse valor de  $\lambda$ , o modelo homogêneo prevê um desempenho superior ao desempenho medido. Esse resultado mostra que a hipótese de escoamento homogêneo no interior do impelidor é válida para uma condição operacional extremamente restrita. A partir do padrão *Agglomerated Bubble Flow*, a hipótese de escoamento homogêneo não é mais válida. As bolhas de gás começam a coalescer dentro do impelidor, diminuindo a sua velocidade em relação ao líquido e, consequentemente, aumentando o deslizamento entre as fases.



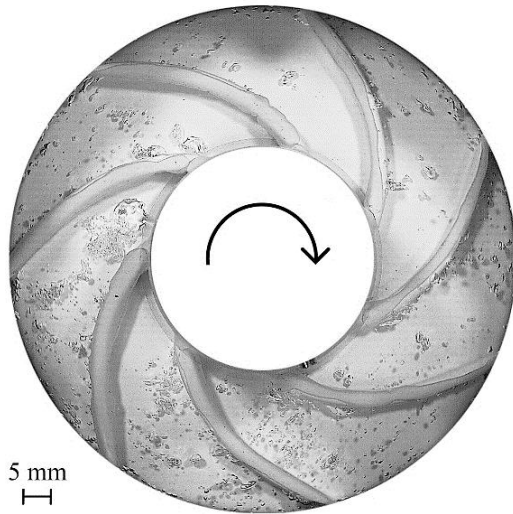
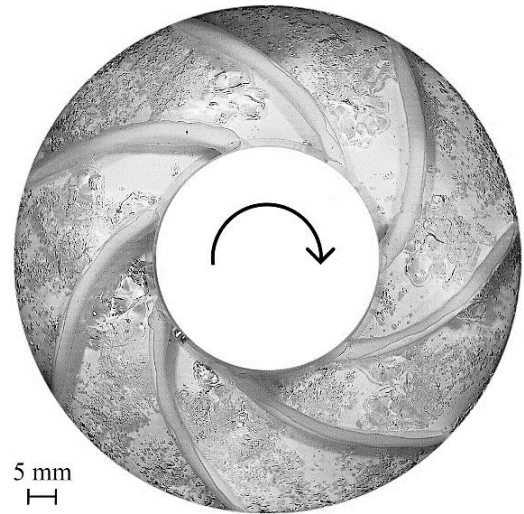
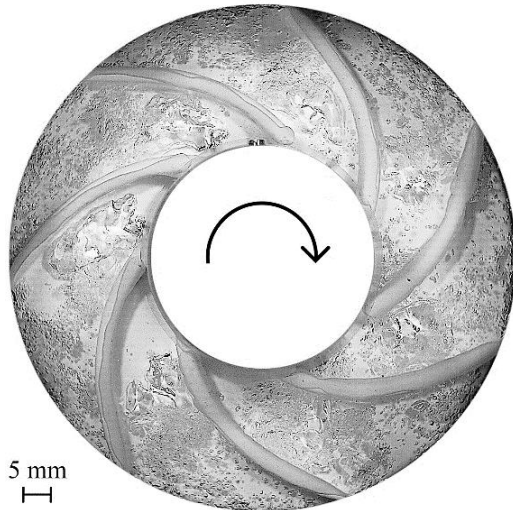
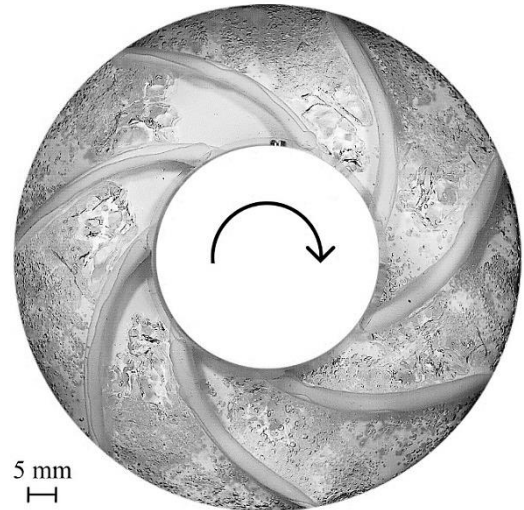
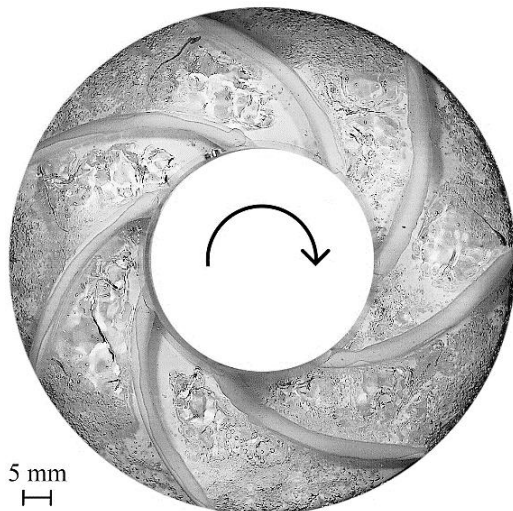
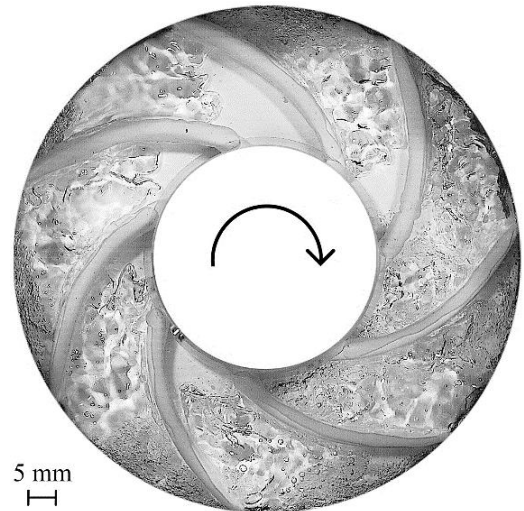
IM12,  $\lambda=0,20\%$ IM13,  $\lambda=1,67\%$ IM14,  $\lambda=1,85\%$ IM15,  $\lambda=1,99\%$ IM16,  $\lambda=2,78\%$ IM17,  $\lambda=4,17\%$

Figura 3.28 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ .

A rotação é outro parâmetro importante no desempenho de bombas centrífugas operando com escoamento bifásico gás-líquido. A Figura 3.29 apresenta os resultados para o teste a vazão de líquido constante nas rotações de 900, 1200 e 1500 rpm. As vazões de líquido escolhidas correspondem aos pontos de melhor eficiência para cada rotação na operação monofásica com água. Todos os testes foram realizados à pressão de sucção constante de 150 kPa. A visualização do escoamento nos IM18 a IM24 é apresentada na Figura 3.30.

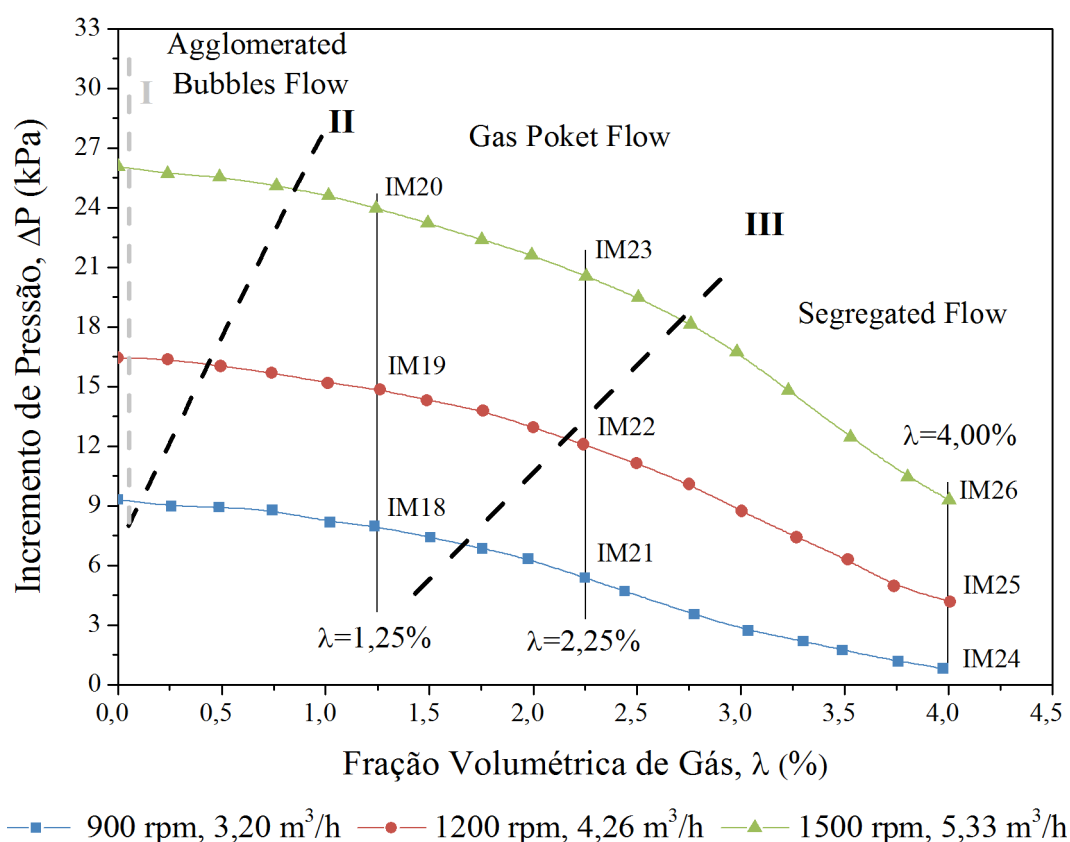


Figura 3.29 – Desempenho da bomba protótipo operando com mistura bifásica no teste de vazão de líquido constante nas rotações de 900, 1200 e 1500 rpm.

Esses resultados evidenciam a influência da rotação no padrão de escoamento e no desempenho da bomba. Quanto maior a rotação, maior o valor de  $\lambda$  onde ocorrerá a transição entre as fases. Para a rotação de 900 rpm, o padrão Agglomerated Bubble Flow praticamente não é observado, enquanto na rotação de 1500 rpm, esse mesmo padrão estende-se até  $\lambda = 0,7\%$ . Um comportamento semelhante é observado para as outras transições. A degradação do desempenho da bomba torna-se menos severa com o aumento da rotação.

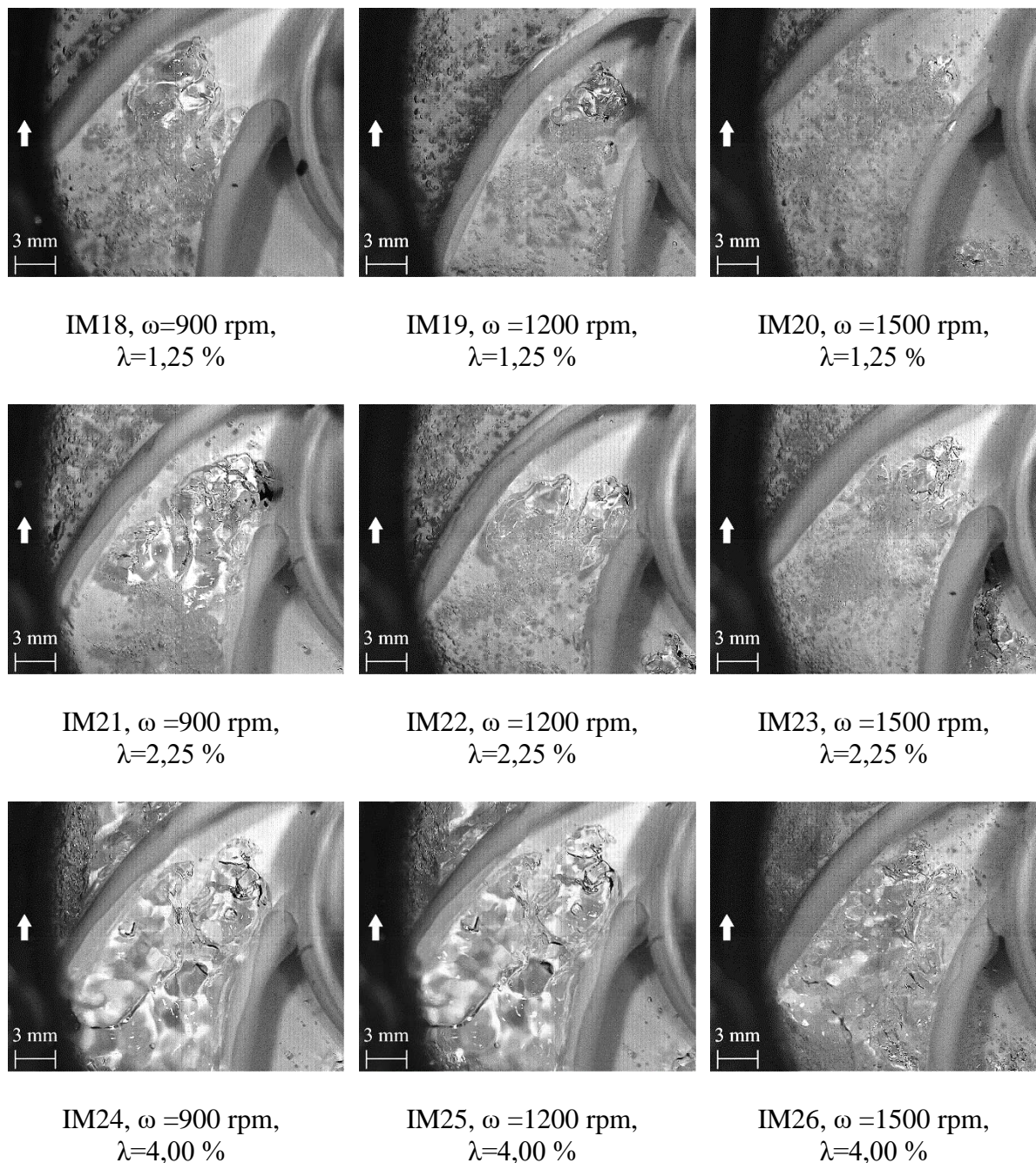


Figura 3.30 – Visualização do escoamento para a bomba operando com mistura bifásica gás-líquido no teste de vazão de líquido constante nas rotações de 900, 1200 e 1500 rpm.

Os pontos IM18, IM19 e IM20 apresentam a mesma fração volumétrica de gás,  $\lambda=1,25\%$ . Essas três condições operacionais são classificadas como *Gas Pocket Flow*. No entanto, observa-se que o acúmulo de gás é menor com o aumento da rotação.

Para as imagens IM21, IM22 e IM23 a fração volumétrica de gás é de  $\lambda=2,25\%$ . Na imagem IM21, rotação de 900 rpm, observa-se o padrão *Segregated Flow*. Já na imagem IM23, rotação de 1500 rpm, o padrão de escoamento é o *Gas Pocket Flow*. O ponto IM22 está na transição entre os padrões *Gas Pocket Flow-Segregated Flow*.

Os pontos IM24 a IM26 têm fração de gás de 4% e padrão observado é o *Segregated Flow*.

Os efeitos da fração de gás e da rotação no desempenho da bomba podem ser entendidos analisando as forças que agem na bolha no interior do impelidor. Embora outras forças atuem nas bolhas, seu movimento é governado por duas forças: força de arrasto ( $F_D$ ) e a força devido ao gradiente de pressão no interior do canal do impelidor ( $F_{\nabla P}$ ), conforme descrito por Minemura e Murakami (1980).

A força de arrasto  $F_D$  é definida por:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_L C_D \left( \frac{\pi d_b^2}{4} \right) (V_L - V_G) |V_L - V_G| \quad (3.4)$$

onde  $V_L$  e  $V_G$  são a velocidade do líquido e do gás, respectivamente,  $d_b$  é o diâmetro da bolha e  $C_D$  é o coeficiente de arrasto.

Sendo, segundo Minemura e Murakami (1980), para uma bolha esférica o coeficiente de arrasto  $C_D$ , dado por:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} + 2 & Re \leq 6,5 \\ \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) & 6,5 < Re < 989 \\ 0,44 & Re \geq 989 \end{cases} \quad (3.5)$$

Sendo o número de Reynolds definido por:

$$Re = \frac{\rho_L |u_L - u_G| d_b}{\mu_L} \quad (3.6)$$

A força devido ao gradiente de pressão no interior do canal do impelidor  $F_{\nabla P}$  é definida por:



$$F_{\nabla P} = \frac{\pi d^3}{6} \left( \frac{\partial P}{\partial s} \right) \quad (3.7)$$

onde  $\partial P / \partial s$  é o gradiente de pressão ao longo da linha de corrente.

Ambas as forças são mostradas esquematicamente na Figura 3.31. A força de arrasto  $F_D$  ocorre devido ao escorregamento entre as fases, sendo a velocidade do líquido maior que a velocidade do gás. Essa força tende a carrear a bolha de gás para fora do impelidor. A força  $F_{\nabla P}$  ocorre devido ao gradiente de pressão adverso ao qual a bolha está sujeita. Essa força tem orientação para o centro do impelidor. A força resultante dessas duas forças tende a desviar as bolhas das linhas de correntes do líquido e age no sentido do lado de alta pressão da pá do canal.

O acúmulo ou não de gás dentro do impelidor depende da força resultante entre  $F_D$  e  $F_{\nabla P}$ . Quando maior a vazão de líquido, maior a força de arrasto e menor é o desvio da trajetória da bolha em relação a do líquido. Quando a força  $F_{\nabla P}$  aumenta, devido, por exemplo, ao aumento da rotação, a força resultante  $F_R$  desvia a trajetória da bolha no sentido do lado de alta pressão da pá do impelidor onde ocorre a aglomeração do gás.

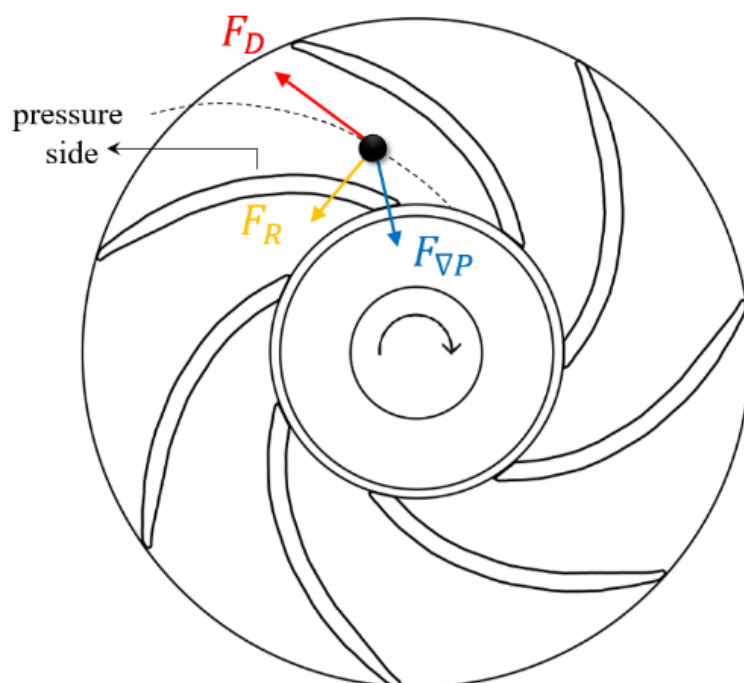


Figura 3.31 – Balanço de forças aplicado em uma bolha no interior do impelidor de uma bomba centrífuga.

### 3.3.2.3 Testes de Desempenho com Escoamento Monofásico de Solução Água/Glicerina

A Figura 3.32 apresenta o desempenho monofásico da bomba protótipo operando com solução água/glicerina, rotação de 900 rpm e viscosidades de 13, 20, 32 e 50 cP. A curva monofásica com água, também, é apresentada como referência.

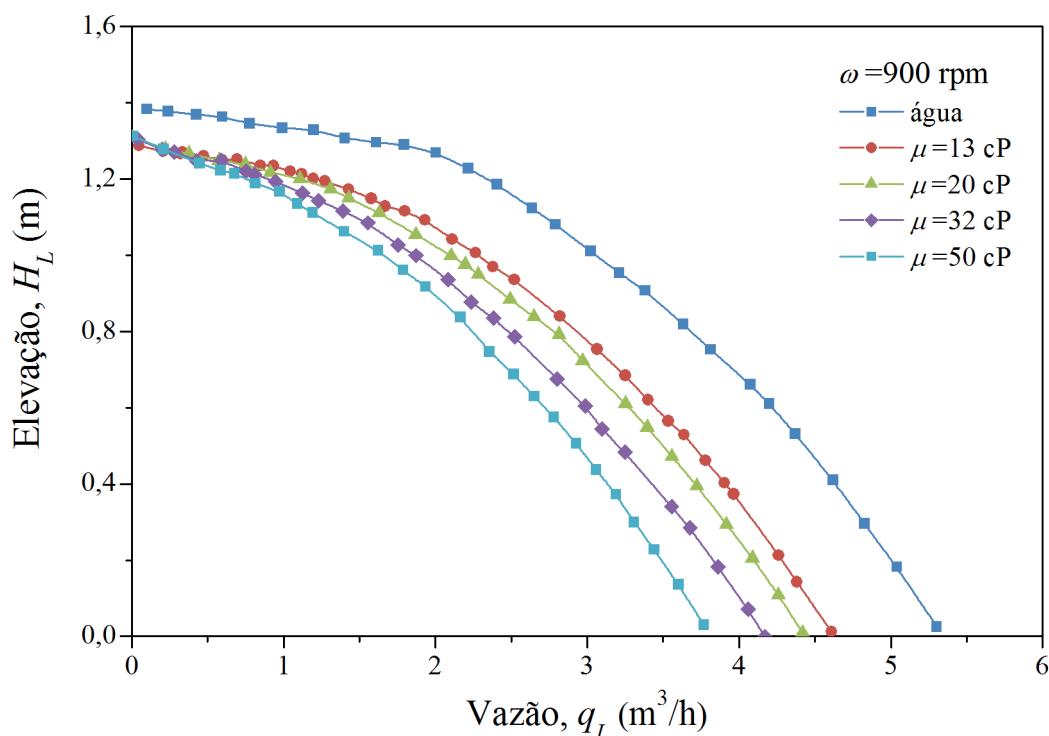


Figura 3.32 – Desempenho monofásico da bomba protótipo operando com solução água/glicerina,  $\omega = 900 \text{ rpm}$  e viscosidades de 13, 20, 32 e 50 cP.

O aumento da viscosidade degrada o desempenho da bomba. As perdas viscosas tornam-se uma importante parcela da energia dissipada pelo escoamento no interior do impelidor. Nessas condições, as leis de similaridade não são mais aplicáveis conforme foram para o escoamento monofásico de água. O coeficiente de elevação passa ser função, além do coeficiente de vazão, do número de Reynolds rotacional. Na condição de vazão zero, a altura de elevação tende a ser a mesma, independentemente da viscosidade do fluido.

### 3.3.2.4 Teste de Desempenho com Escoamento Bifásico Água/Glicerina-Ar

Os testes bifásicos utilizando a solução de glicerina em água têm como objetivos investigar o efeito da viscosidade no arranjo entre as fases no interior da bomba. A Figura 3.33 apresenta os resultados do desempenho da bomba protótipo operando com rotação de 900 rpm,

pressão de sucção de 150 kPa, viscosidade de 13 cP e vazões de ar de 0,0125, 0,025 e 0,050 kg/h. A curva de desempenho monofásico na viscosidade de 13 cP, também, é apresentada como referência.

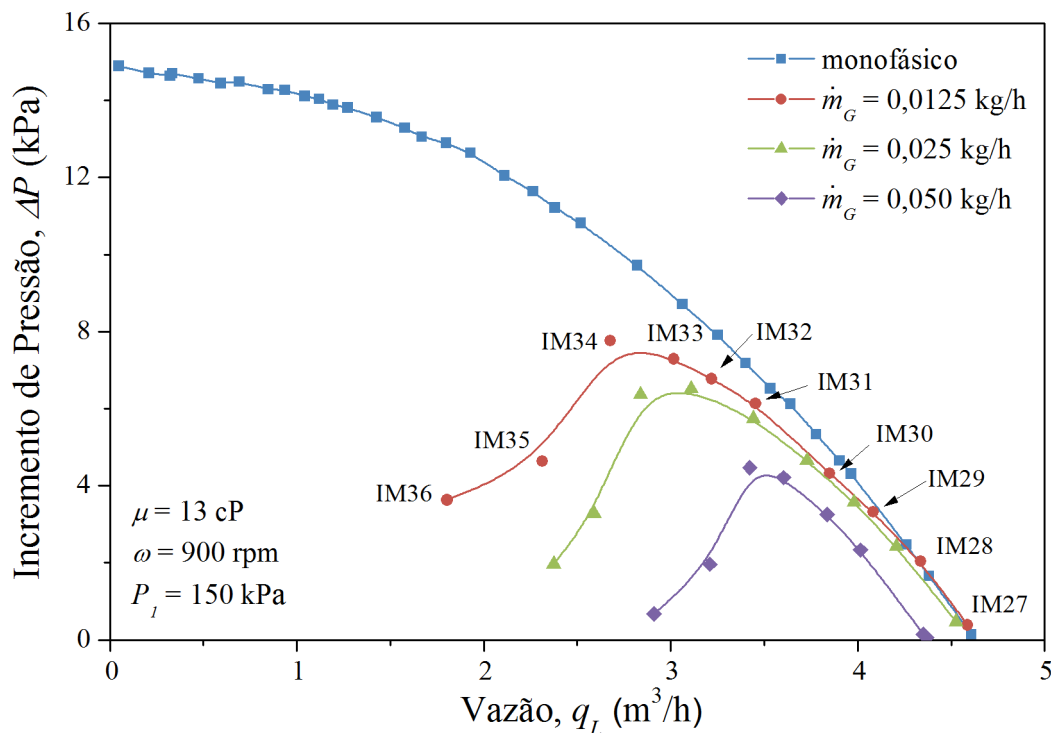
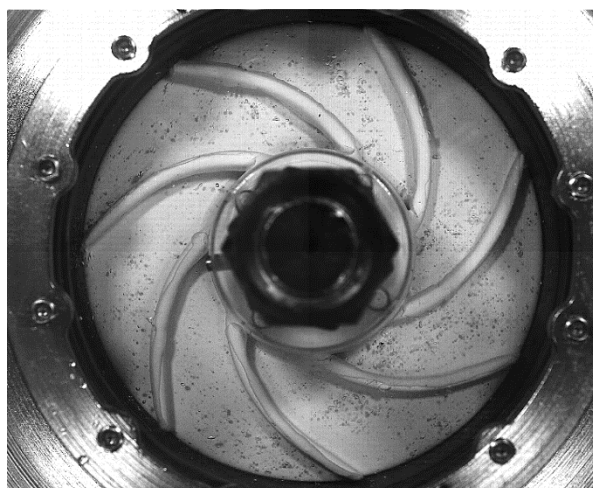
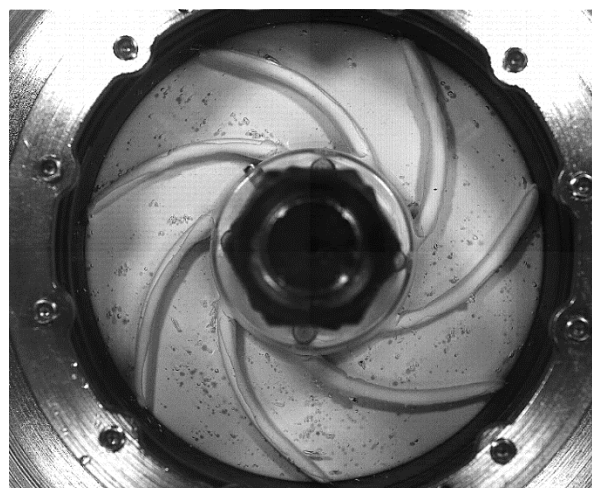
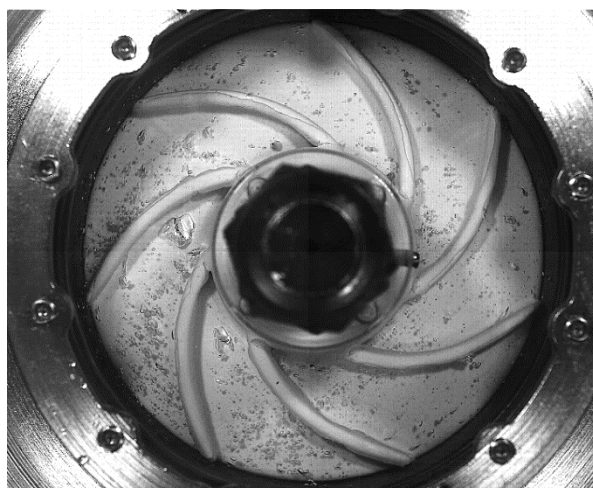
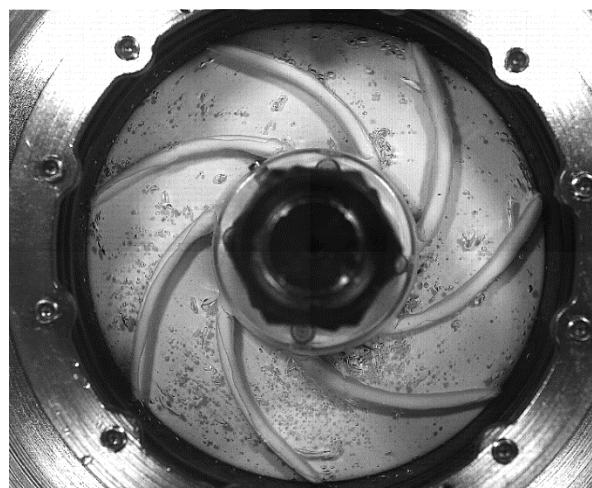
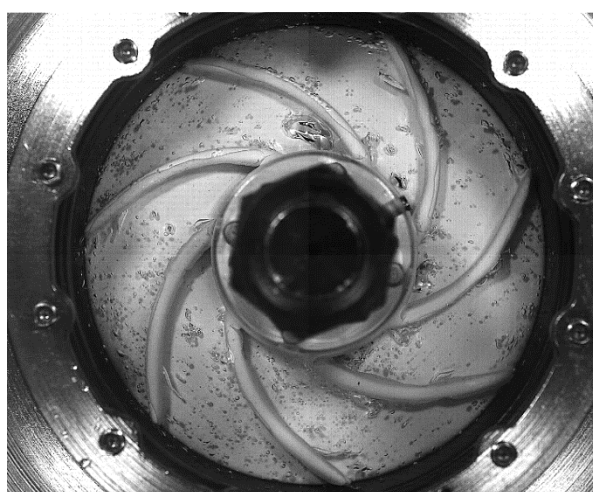
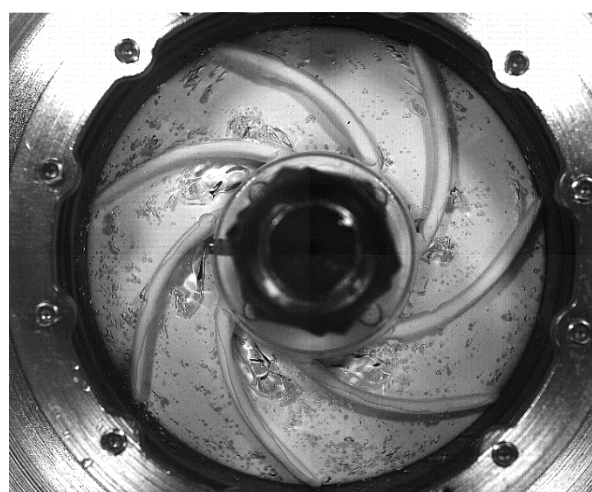


Figura 3.33 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura água/glicerina-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$  e diferentes vazões de ar.

Os pontos IM 27 a IM36 da Figura 3.33 fazem referência ao teste com vazão mássica de 0,0125 kg/h. Essa condição operacional é escolhida para ilustrar a visualização do escoamento no interior do impelidor. A visualização do padrão de escoamento referente a cada um desses pontos é mostrada na Figura 3.34 e do Vídeo 22 até o Vídeo 31.

O efeito de degradação devido à viscosidade do líquido soma-se ao efeito de degradação causado pela fase compressível, reduzindo a capacidade da bomba de tolerar a presença de gás. As curvas de desempenho apresentam as mesmas características observadas no escoamento água-ar, porém com uma degradação do desempenho bastante acentuada.

Os mesmos padrões de escoamento identificados para a mistura água-ar são observados para a operação bifásica com fluido viscoso. No entanto, o padrão *Bubble Flow* é extremamente restrito, sendo observado apenas nos pontos IM 27 e IM 28. Nesses pontos, as bolhas de gás não possuem formato esférico. O diâmetro, acima do crítico, faz com que as bolhas sejam intensamente deformáveis pelo escoamento.

IM27,  $\lambda=0,14$  %IM28,  $\lambda=0,15$  %IM29,  $\lambda=0,17$  %IM30,  $\lambda=0,18$  %IM31,  $\lambda=0,20$  %IM32,  $\lambda=0,21$  %



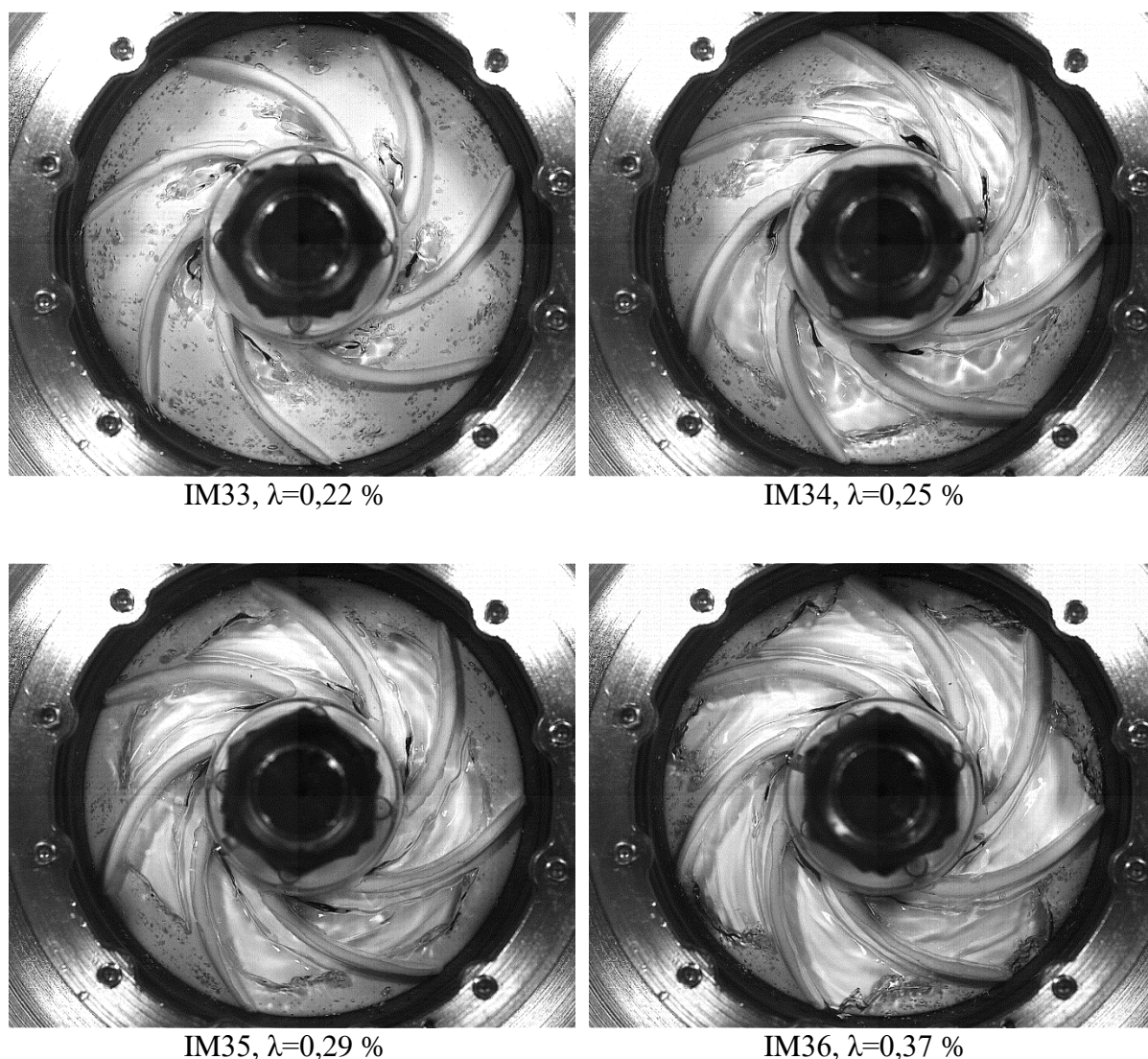


Figura 3.34 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar,  $\mu = 13 \text{ cP}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ .

O desempenho da bomba diminui, progressivamente, com o aumento da fração de gás. O padrão *Agglomerated Bubble Flow* é identificado no ponto IM 29. Desse ponto em diante, o desempenho da bomba começa a desviar-se do desempenho monofásico. São visualizadas grandes bolhas isoladas, dando início ao padrão *Gas Pocket Flow*. Esse padrão estende-se dos pontos IM30 a IM33.

O Ponto IM33 ilustra a condição limite para o padrão *Gas Pocket Flow*. São observadas grandes bolhas de ar que se concentram na aresta de entrada do impelidor, na região de baixa pressão das pás. Relacionado a esse ponto, é observado o ponto de *Surging* na curva de desempenho.

Com o aumento da fração de gás, é observado o padrão *Segregated Flow*, IM34 a IM36. A bolha estacionária de gás aumenta de tamanho, estendendo-se, radialmente, e ocupando todo canal do impelidor. Essa estrutura de gás se posiciona juntamente à face de baixa pressão da pá do impelidor, enquanto o líquido escoar pelo canal formado junto a face de alta pressão. As ondas interfaciais presentes na bolha estacionária indicam a estratificação do escoamento também na direção axial do impelidor.

A jusante da bolha estacionária é observada uma região de intenção recirculação, em que bolhas menores se despendem e são carregadas pela corrente de líquido para a aresta de saída do impelidor.

A seção do canal, transversal ao escoamento, é ocupada na sua maioria pela fase gás, reduzindo quase a zero a capacidade da bomba de transferir energia a mistura.

A Figura 3.35 apresenta os resultados do desempenho da bomba protótipo operando com rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa, viscosidade de 20 cP e vazões de ar de 0,0125 e 0,025 kg/h. Os pontos IM 37 a IM43 fazem referência ao teste com vazão mássica de 0,025 kg/h. A visualização do escoamento nesses pontos é apresentada na Figura 3.36.

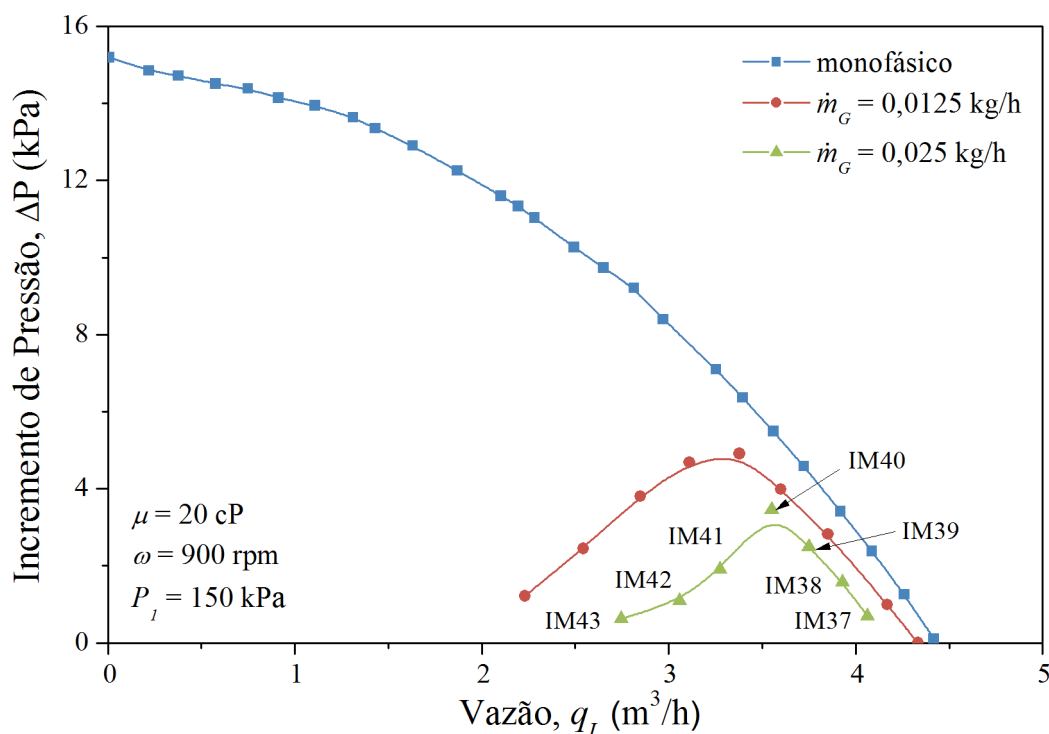
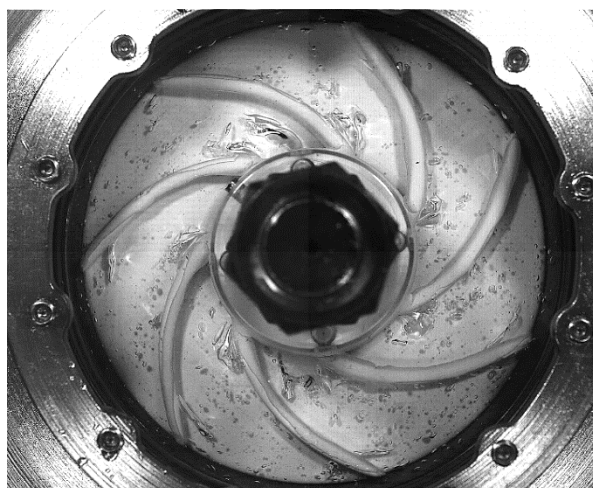
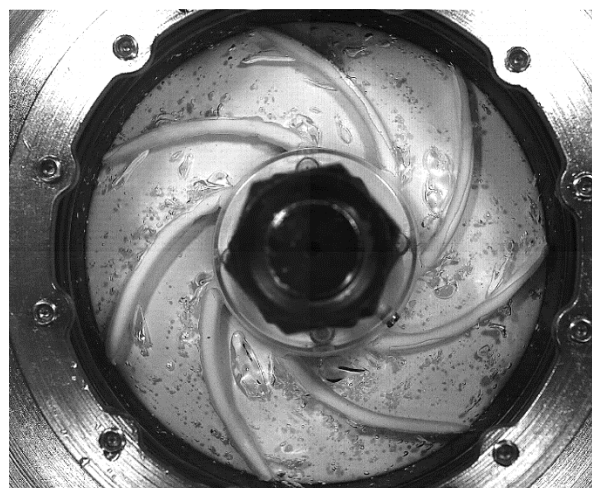
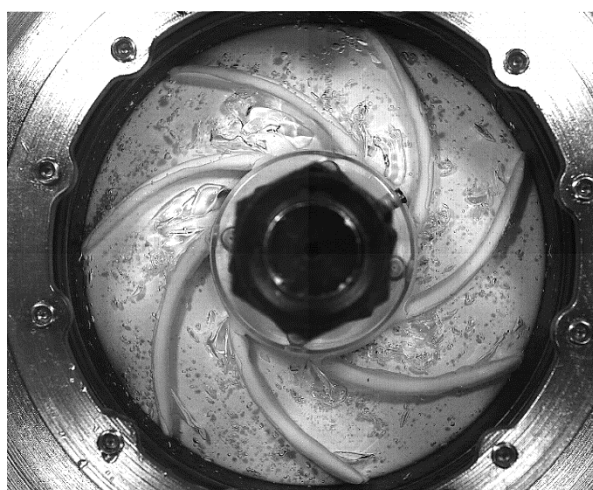
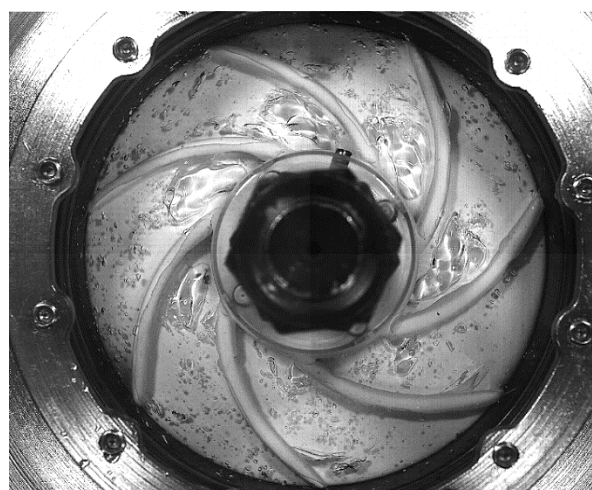
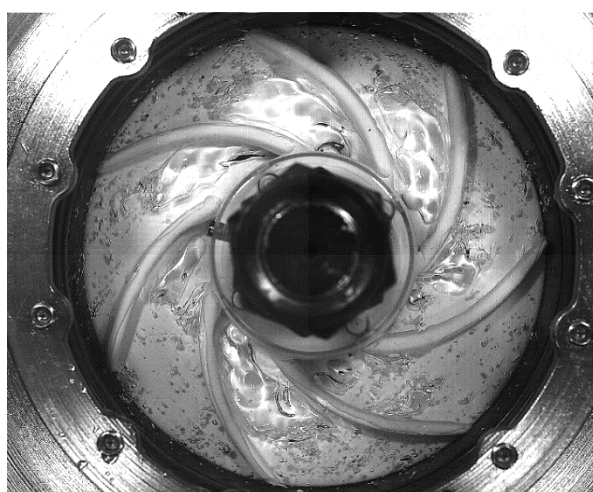
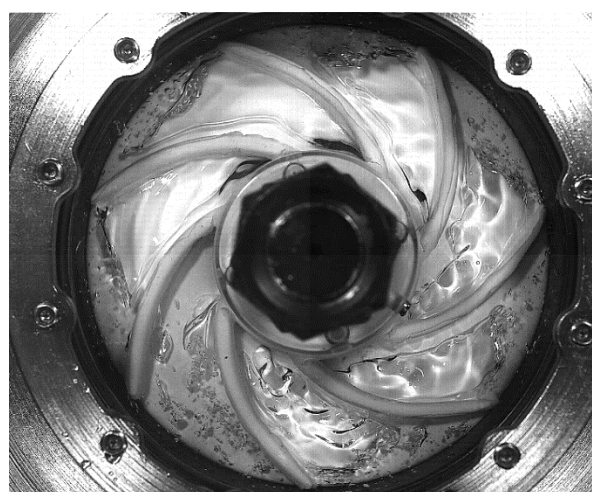


Figura 3.35 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar, diferentes vazões de gás,  $\mu = 20$  cP,  $\omega = 900$  rpm e  $P_i = 150$  kPa.

IM37,  $\lambda=0,32$  %IM38,  $\lambda=0,33$  %IM39,  $\lambda=0,36$  %IM40,  $\lambda=0,37$  %IM41,  $\lambda=0,40$  %IM42,  $\lambda=0,43$  %

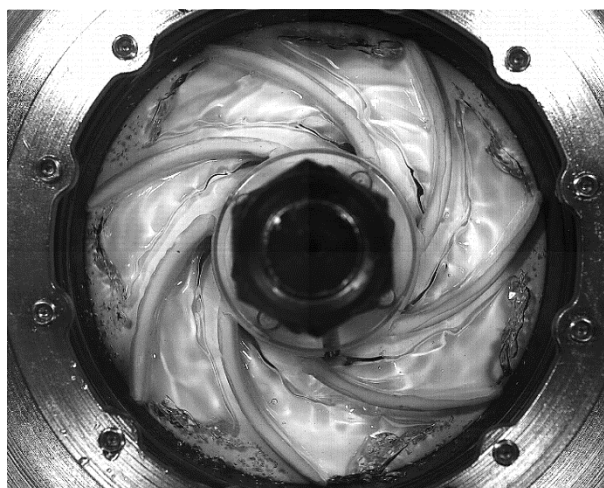
IM43,  $\lambda=0,48\%$ 

Figura 3.36 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar,  $\mu = 20 \text{ cP}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$

Com o aumento da viscosidade da fase líquida, os padrões *Bubble Flow* e *Agglomerated Bubble Flow* não são observados. Mesmo para pequenas frações de gás, nas condições iniciais do teste, as bolhas já possuem dimensões consideráveis e interfaces intensamente deformáveis.

Os pontos IM37 a IM40 são caracterizados pelo padrão *Gas Pocket Flow*, enquanto nos pontos IM41 a IM43 observa-se o padrão *Segregated Flow*.

A Figura 3.37 apresenta os resultados do desempenho da bomba protótipo operando com rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa, viscosidade de 32 cP e vazão de ar de 0,0125 kg/h. A visualização do escoamento nos pontos IM44 a IM47 é apresentada na Figura 3.38.

Nessas condições operacionais a bomba não é capaz de tolerar a mínima presença de gás. O efeito do campo centrífugo sobrepõe-se a força de arrasto, fazendo com que a fase gás segregue no interior do impelidor. A capacidade da bomba de gerar pressão é praticamente nula.

O padrão *Gas Pocket Flow* ocorre apenas no ponto IM 44. Nesse ponto, as bolhas de gás possuem características alongadas. Praticamente não se observa quebra das bolhas, devido a redução da turbulência pela viscosidade do líquido. Nos pontos IM 45 a IM 47, observa-se o padrão *Segregated Flow*.

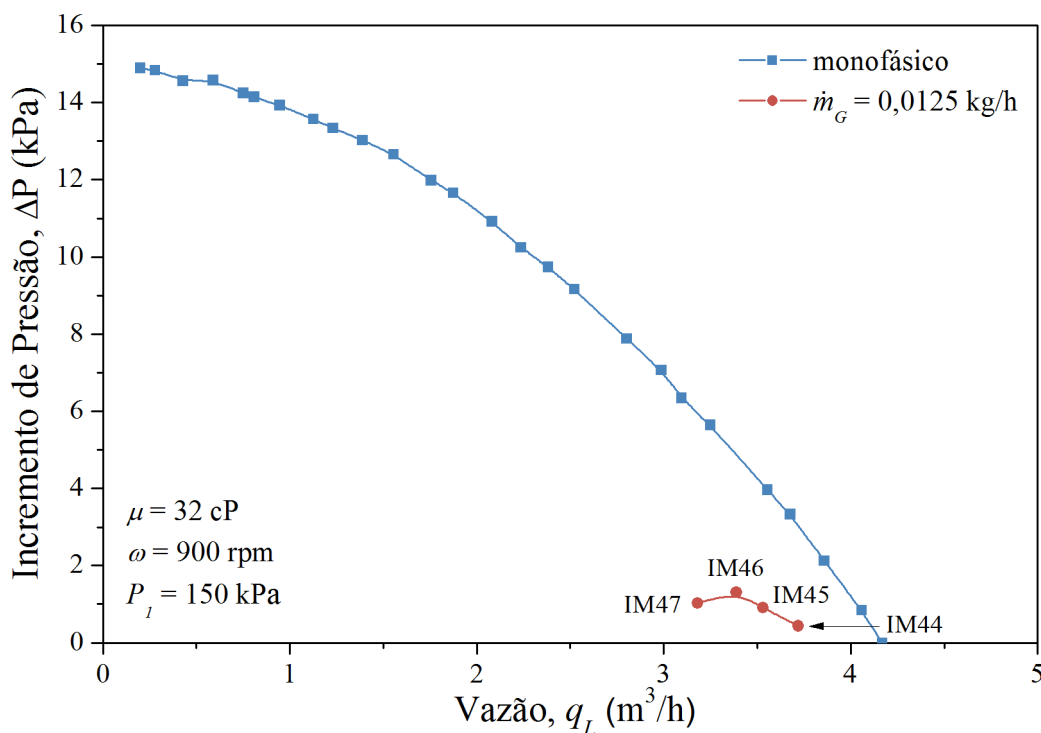


Figura 3.37 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar,  $\mu = 32 \text{ cP}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_s = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ .

A Figura 3.39 apresenta os resultados do desempenho da bomba protótipo operando com rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa, viscosidade de 52 cP e vazão de ar de 0,0125 kg/h. A visualização do escoamento nos pontos IM48 a IM51 é apresentada na Figura 3.40 e no Vídeo 32 até o Vídeo 35.

Para a maior viscosidade testada, foi observado, apenas, o padrão *Segregated Flow*. Nessas condições, as bolhas estacionárias de gás bloqueiam praticamente todo impelidor. A bomba é incapaz de transferir energia a mistura.

Nesses testes observou-se que, após as bolhas de gás bloquearem o impelidor, mesmo que a vazão de gás seja nula, o desbloqueio só é possível pelo aumento da pressão de sucção ou da rotação.

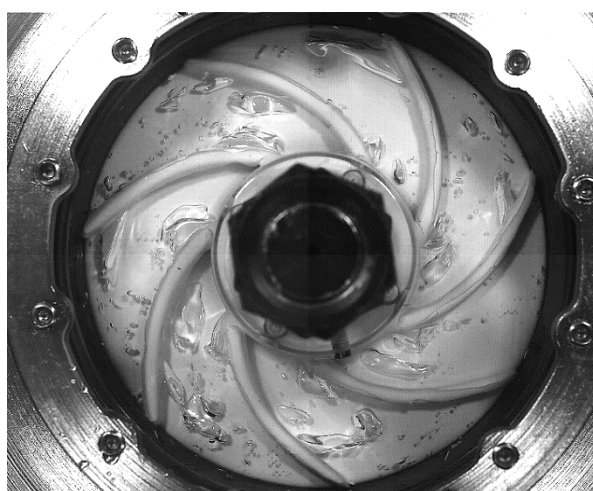
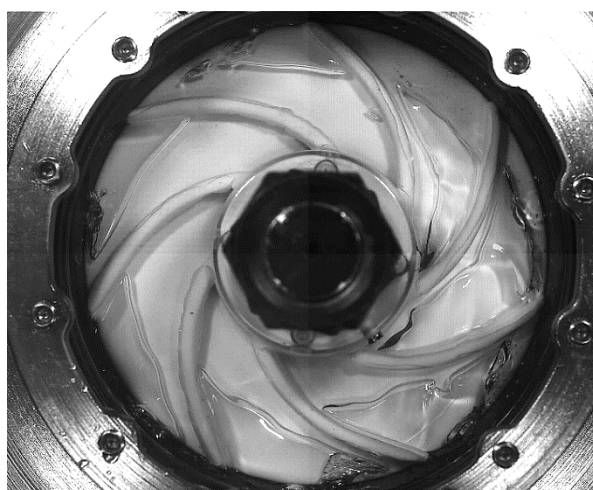
IM44,  $\lambda=0,43\%$ IM45,  $\lambda=0,91\%$ IM46,  $\lambda=1,31\%$ IM47,  $\lambda=1,50\%$ 

Figura 3.38 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar,  $\mu = 32 \text{ cP}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ .

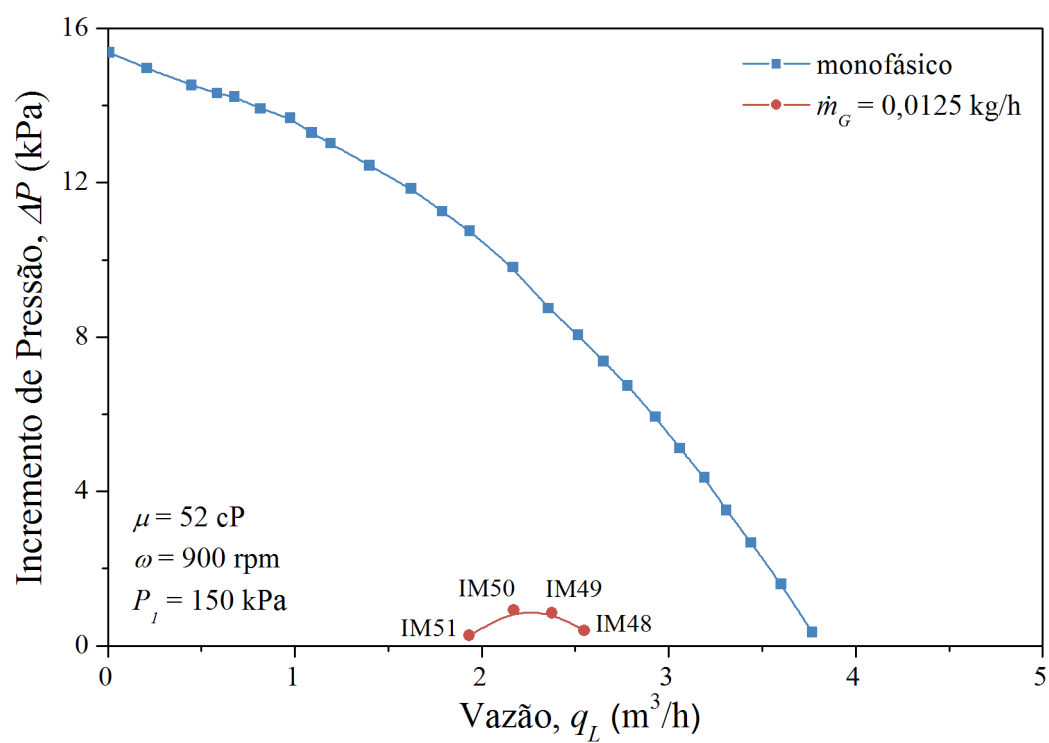


Figura 3.39 – Desempenho bifásico da bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar,  $\mu = 52$  cP,  $\omega = 900$  rpm,  $P_1 = 150$  kPa e  $\dot{m}_G = 0,0125$  kg/h.



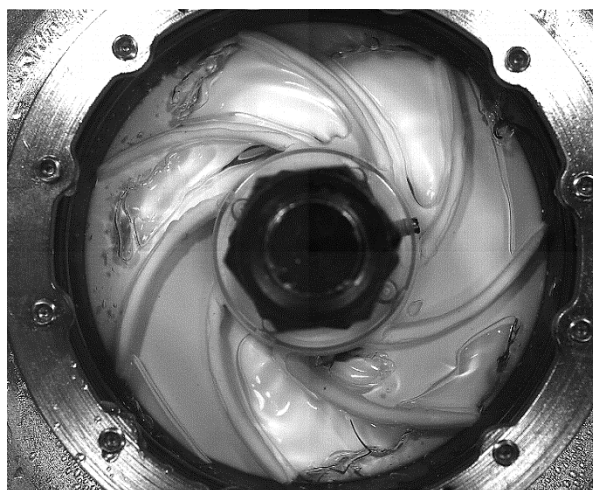
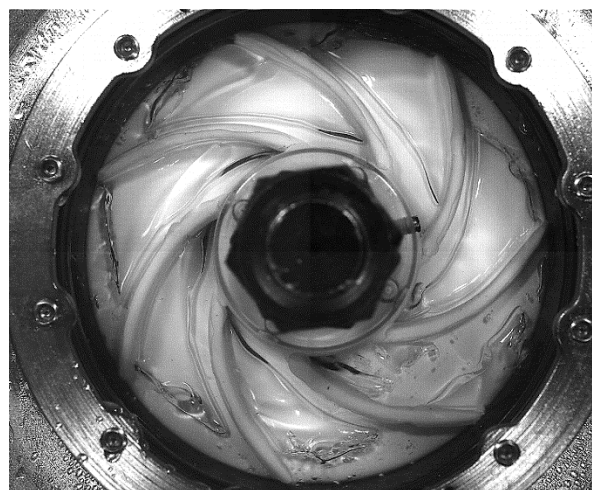
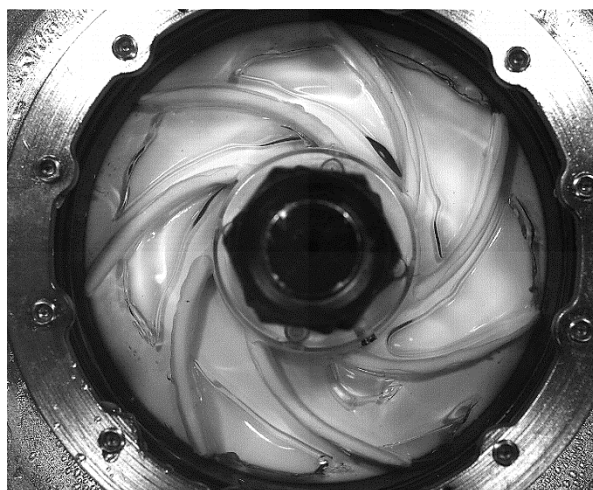
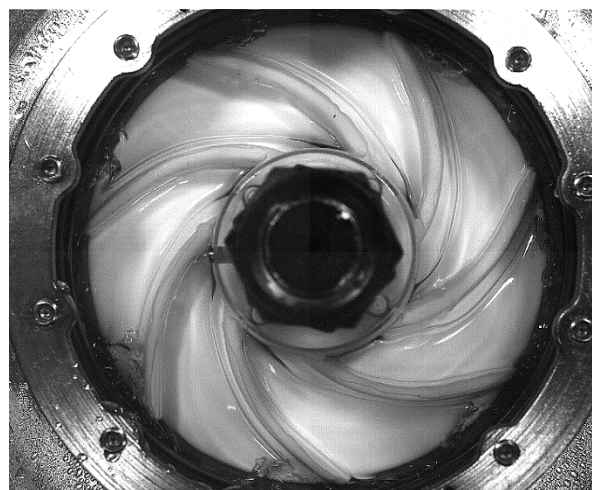
IM48,  $\lambda=0,24$  %IM49,  $\lambda=0,26$  %IM50,  $\lambda=0,27$  %IM51,  $\lambda=0,31$  %

Figura 3.40 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando com mistura bifásica água/glicerina-ar,  $\mu = 52$  cP,  $\omega = 900$  rpm,  $P_1 = 150$  kPa e  $\dot{m}_G = 0,0125$  kg/h.



### 3.3.2.5 Teste de Desempenho com Escoamento Monofásico de Água/Isopropanol

A Figura 3.41 apresenta os dados de desempenho adimensionais da bomba protótipo operando com escoamento monofásico dos Fluidos 1, 2 e 3, na rotação de 900 rpm. O desempenho adimensional com água também é apresentado como referência. Na análise desses dados, são consideradas as massas específicas medidas dos Fluidos 1, 2 e 3, conforme Tabela 3.5.

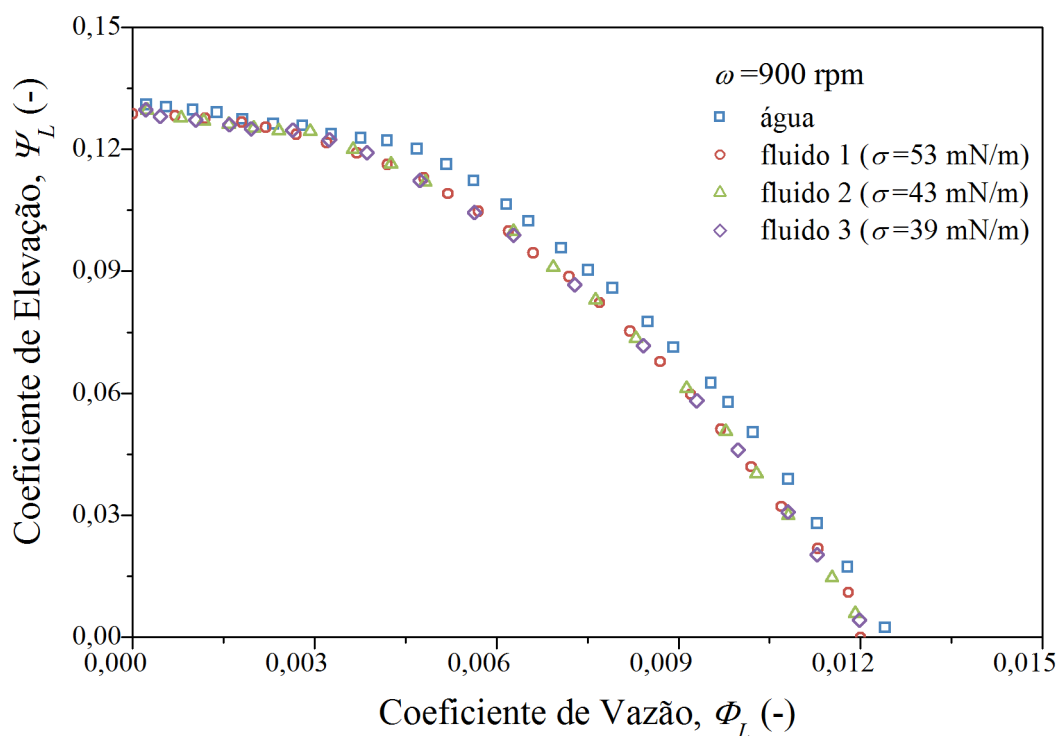


Figura 3.41 – Desempenho monofásico da bomba protótipo operando com solução de isopropanol em água. Fluidos 1, 2 e 3, e  $\omega = 900 \text{ rpm}$ .

Os dados adimensionais de desempenho para as três soluções apresentam a mesma curva, validando as leis de similaridades, mesmo as viscosidades sendo ligeiramente diferentes

### 3.3.2.6 Teste de Desempenho com Escoamento Bifásico Água/Isopropanol-Ar

O efeito da tensão superficial no desempenho bifásico da bomba protótipo é apresentado a seguir.

A Figura 3.42 apresenta o desempenho da bomba operando com a mistura Fluido 1-ar. Os testes foram realizados na rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazões

de ar de 0,025 a 0,125 kg/h. Nessa figura, os pontos e as linhas tracejadas representam os dados medidos para a mistura Fluido 1-ar, enquanto as linhas contínuas, utilizadas como referência, representam a operação com a mistura água-ar. Portanto, as curvas com a mesma cor se diferem pela tensão superficial, 72 mN/m para a linha contínua e 53 mN/m para a linha tracejada.

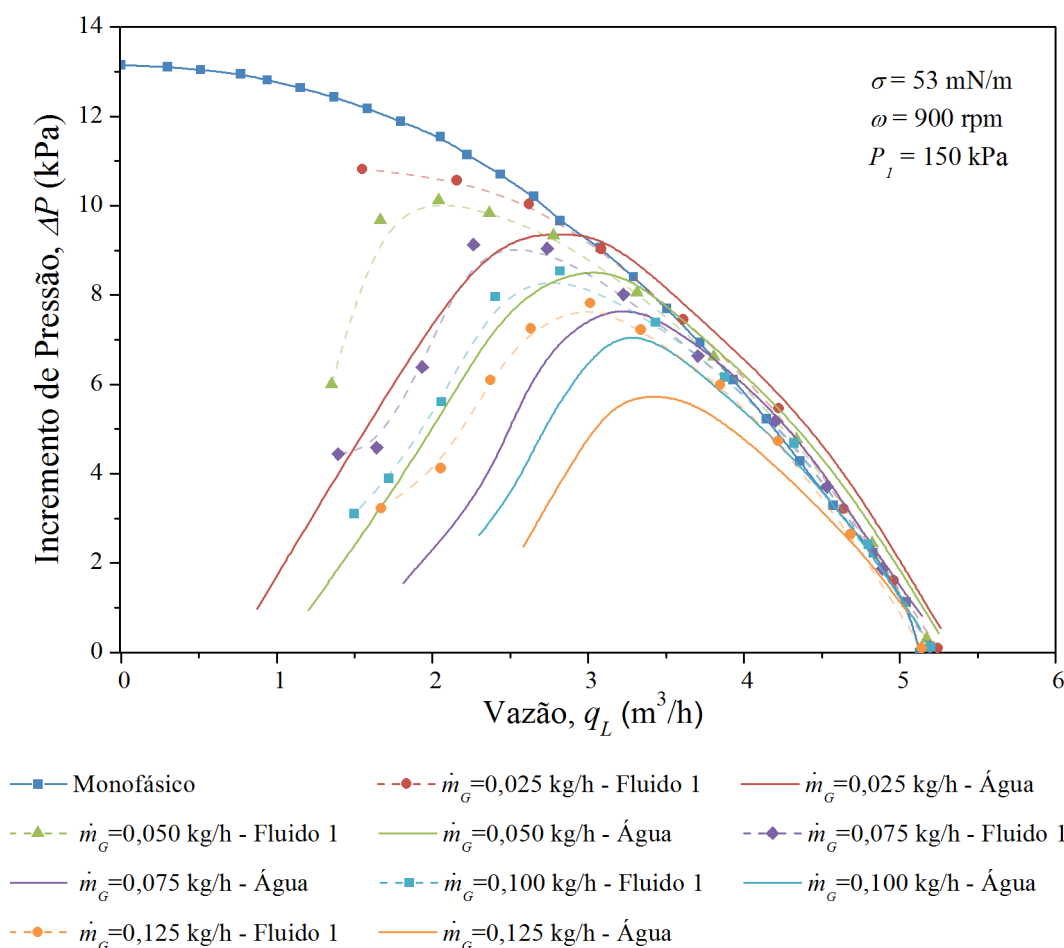


Figura 3.42 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica Fluido 1-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e diferentes vazões mássicas de gás.

Analisando-se os resultados da Figura 3.42 é possível verificar a influência da tensão superficial no desempenho bifásico da bomba protótipo. A redução da tensão superficial aumenta a tolerância da bomba à presença de gás. Em todas as vazões de gás, é observado que a redução da tensão superficial desloca o ponto de *Surging* para a esquerda do gráfico, indicando que o ponto de máximo da curva ocorre para frações gás mais elevadas. Exemplo disso são os resultados para a vazão de ar de 0,050 kg/h, em que o *Surging* ocorre com vazão de líquido de 3,10  $\text{m}^3/\text{h}$  para a mistura água-ar e 2,01  $\text{m}^3/\text{h}$  para a mistura Fluido 1-ar. Em termos de fração volumétrica de gás, isso representa uma fração crítica de 0,98 % para a mistura água-ar e 1,40 % para a mistura Fluido 1-ar.

Para as condições operacionais a direita do ponto de Surging, não é observado uma melhora significativa do desempenho da bomba devido a redução da tensão superficial.

A Figura 3.43 e Figura 3.44 apresentam o desempenho bifásico da bomba protótipo operando com o Fluido 2 e 3, respectivamente. Esses testes foram realizados na rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazões de ar de 0,025 a 0,125 kg/h.

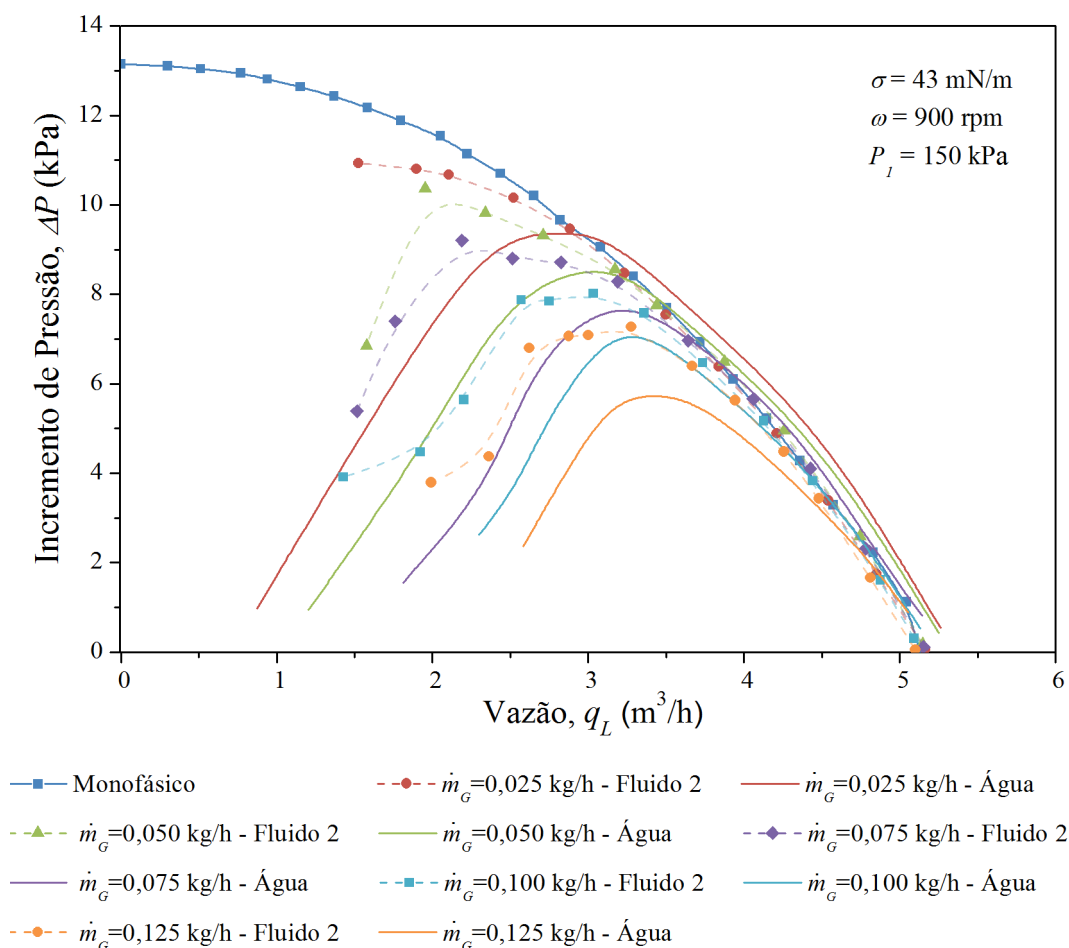


Figura 3.43 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica Fluido 2-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e diferentes vazões mássicas de gás.

As análises feitas para os resultados da Figura 3.42, também, são válidas para os testes como os Fluidos 2 e 3. Em relação à variação da tensão superficial, é observado que quanto maior a redução dessa propriedade da mistura, maior é a fração crítica de gás tolerada pela bomba. Para a vazão de ar de 0,050 kg/h, no teste com o Fluido 1, o *Surging* ocorre para a vazão de líquido de 2,10 m³/h. Para o Fluido 3, o teste é interrompido com vazão de líquido de 1,50 m³/h, sem que o *Surging* fosse observado.

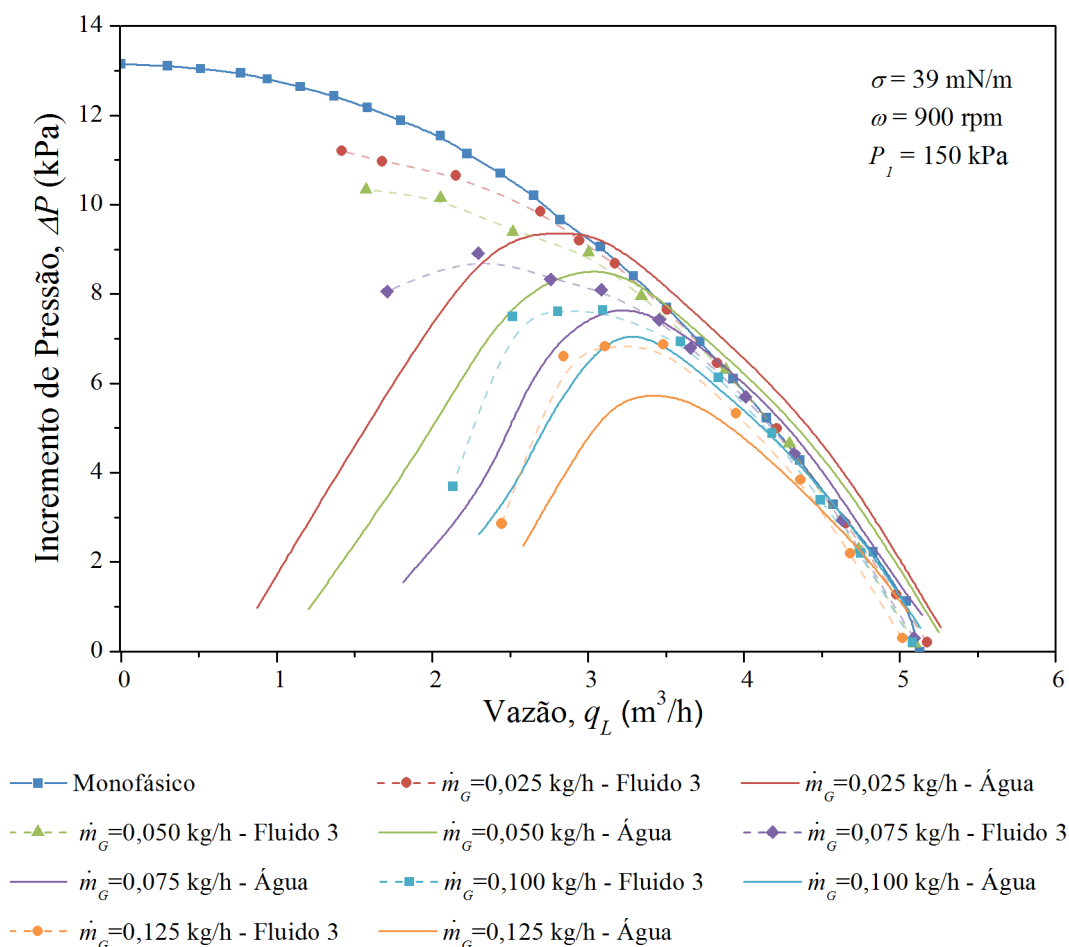


Figura 3.44 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e diferentes vazões mássicas de gás.

O aumento da capacidade da bomba de tolerar a presença de gás, devido à redução da tensão superficial, pode ser explicada por meio da visualização do escoamento no interior do impelidor.

A Figura 3.45 apresenta a comparação entre os desempenhos bifásicos com água, Fluido 1 e Fluido 3, rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazão mássica de gás de 0,025 kg/h. A linha tracejada vertical, próximo à vazão de 3 m³/h, indica a fração volumétrica de aproximadamente 0,50 %. Em termos de desempenho, a pressão gerada pela bomba é praticamente a mesma, independente da tensão superficial da mistura. No entanto, ao se observar o escoamento no interior do impelidor, pontos IM 52 a IM54 da Figura 3.46, é possível notar o início de uma diferenciação no padrão de escoamento gás-líquido. Para o ponto IM 52, mistura água-ar, são observados vestígios iniciais do padrão *Gas Pocket Flow*. Essa condição operacional é próxima ao ponto de *Surging*, e enquanto, para os pontos IM 53 e IM 54, que

possuem tensão superficial menor, é observado o padrão *Bubble Flow*. A população de bolhas com formato esférico se distribuem pelos canais do impelidor sem aparente coalescência.

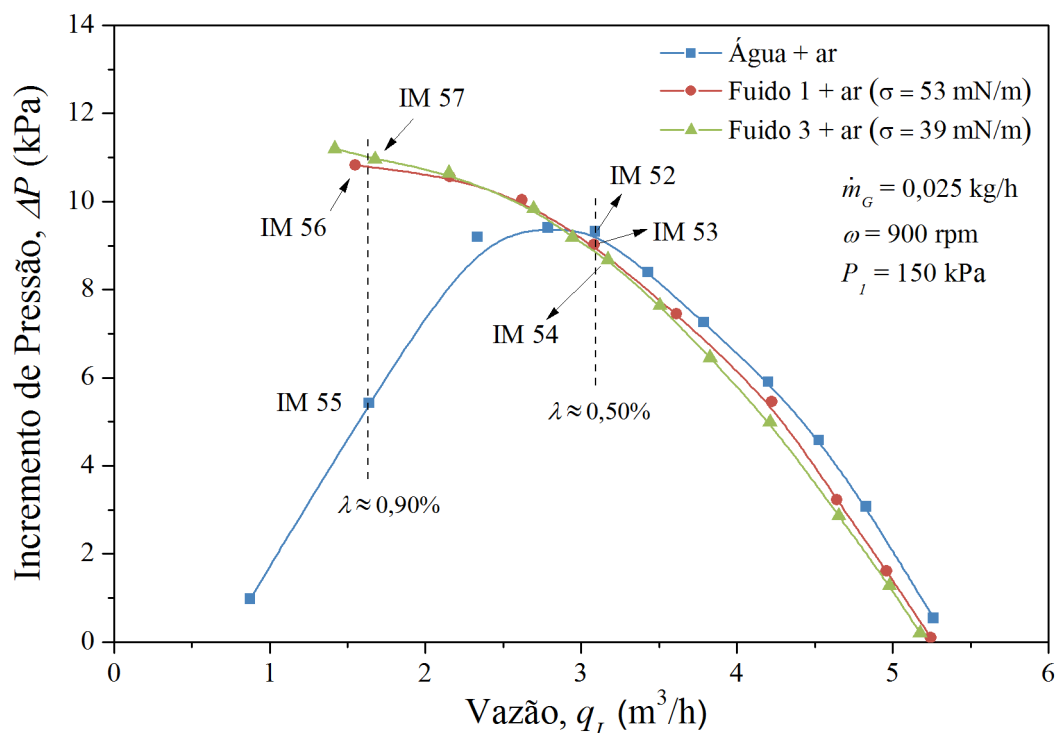
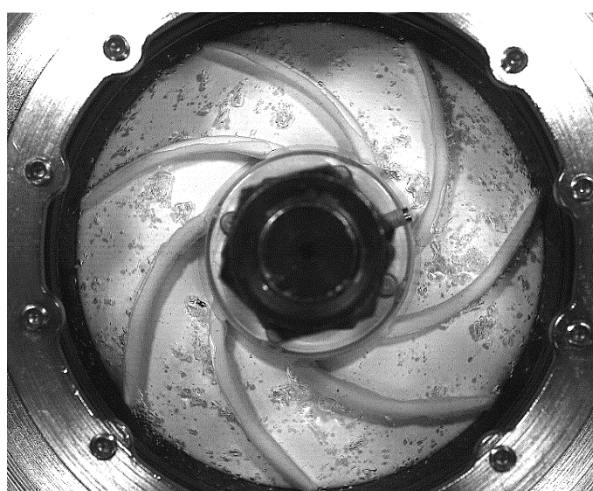


Figura 3.45 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica com água, Fluido 1 e Fluido 3-ar,  $\omega = 900$  rpm,  $P_1 = 150$  kPa e  $\dot{m}_G = 0,025$  kg/h.

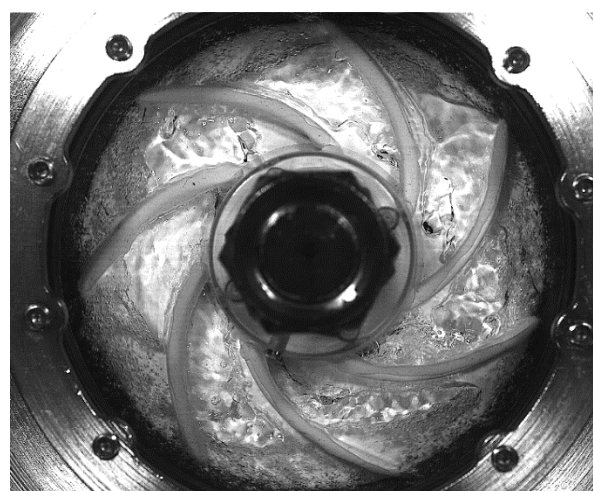
Para a fração volumétrica de aproximadamente 0,90 %, é possível notar uma mudança considerável no desempenho bomba em função da tensão superficial. A operação com os Fluidos 1 e 3 gera mais que dobro da pressão observado com a mistura água-ar.

Essa diferença no desempenho pode ser compreendida observando-se o arranjo entre as fases nos pontos IM 55, 56 e 57. Para o ponto IM 55, observa-se o padrão *Segregated Flow*, enquanto, no ponto IM 56, verifica-se a transição para o padrão *Gas Pocket Flow*. Para o padrão *Gas Pocket Flow* com o Fluido 1, observa-se que a coalescência das bolhas ocorre apenas no olho de entrada do impelidor, diferentemente da operação com água, em que a aglomeração de bolhas ocorria por toda extensão do canal. Para o ponto IM 57, observa-se o padrão *Bubble Flow*. A população de bolhas é tamanha que se assemelha a formação de uma espuma no interior do impelidor. No entanto, o diâmetro reduzido e o formato esférico das bolhas, pouco deformáveis, dificulta qualquer coalescência.

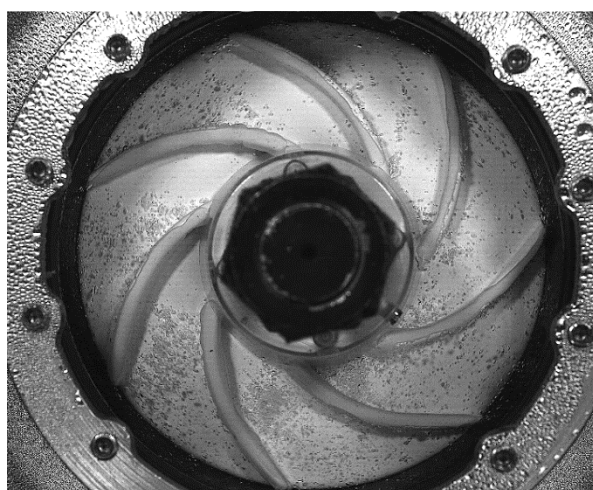
O ponto IM 52 até o ponto IM 57 são mostrados no Vídeo 36 até o Vídeo 41, respectivamente.



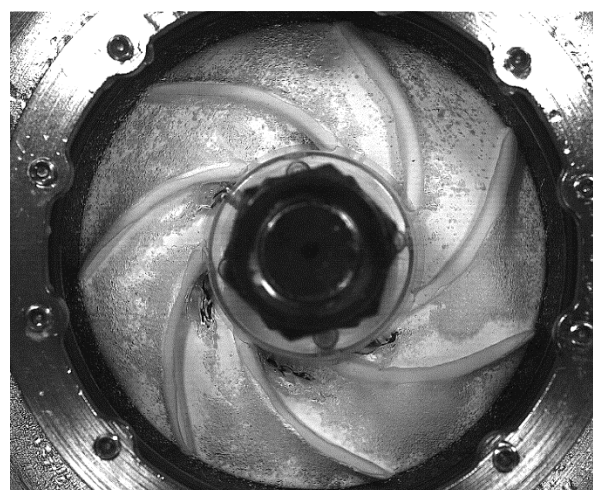
IM52 – Água



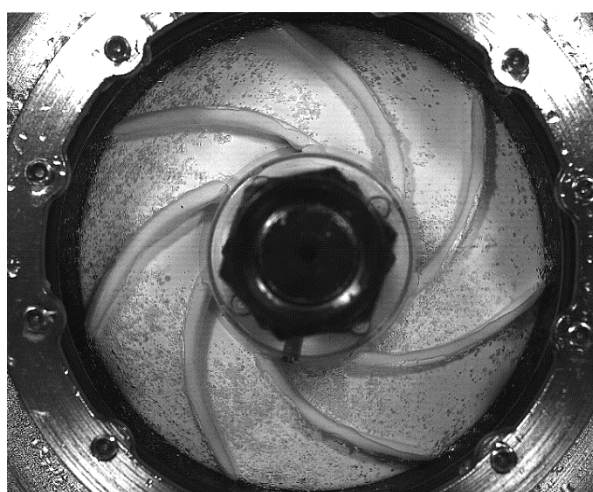
IM55 – Água



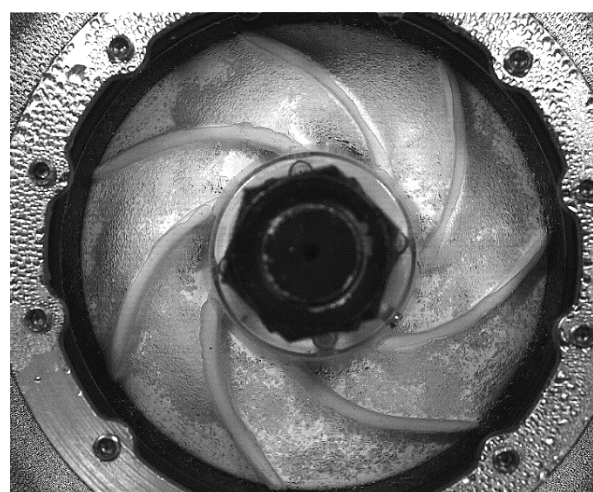
IM53 – Fluido 1



IM56 – Fluido 1



IM54 – Fluido 3



IM57 – Fluido 3

Figura 3.46 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando mistura bifásica com água-ar, Fluido 1-ar e Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ .

A Figura 3.47 apresenta a relação entre o desempenho e o padrão de escoamento com água, Fluido 1 e Fluido 3, rotação de 900 rpm, pressão de sucção de 150 kPa e vazão mássica de gás de 0,075 kg/h.

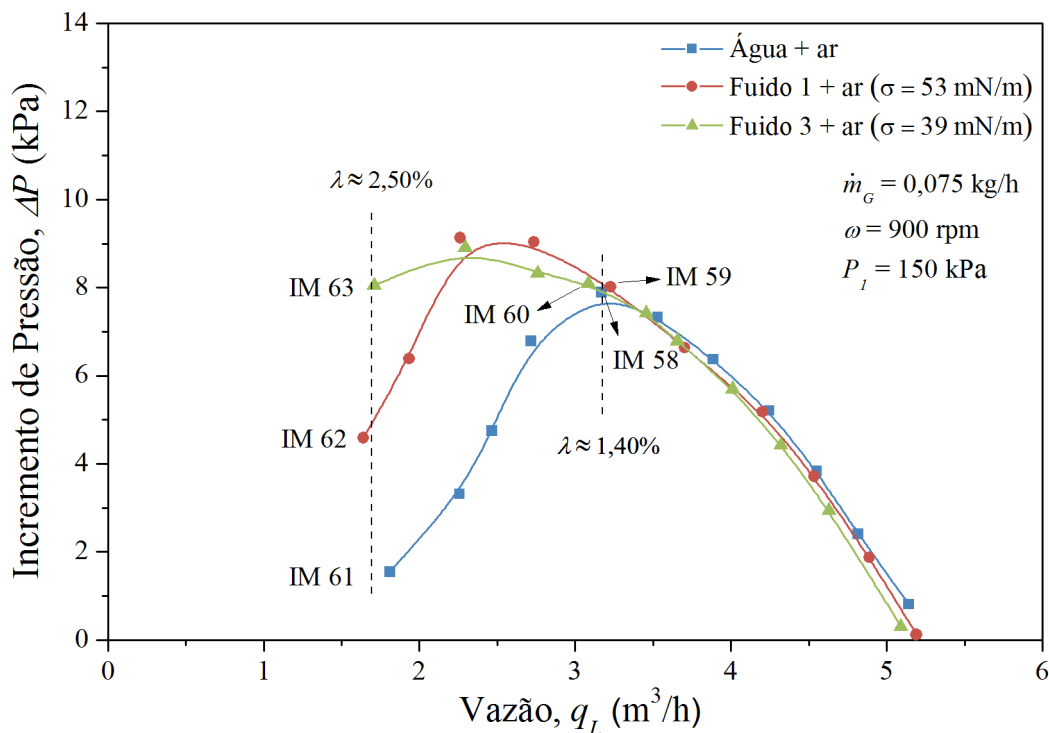
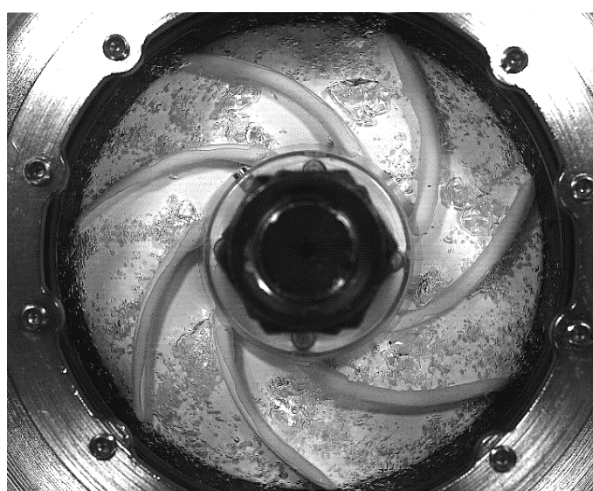


Figura 3.47 – Desempenho da bomba centrífuga operando com mistura bifásica com água, Fluido 1 e Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg/h}$ .

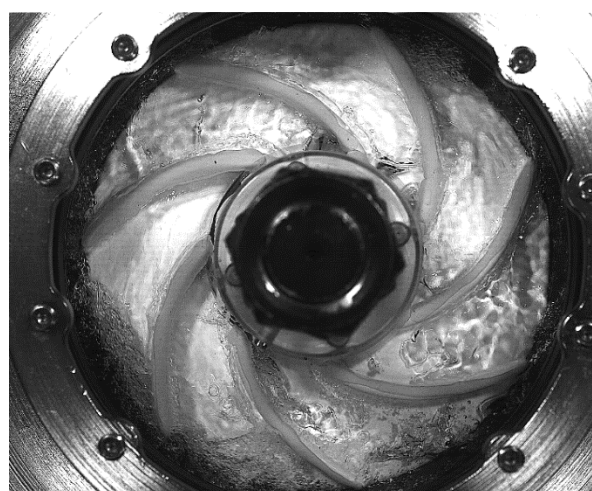
Para a fração de ar de 1,40 %, pontos IM 58, 59 e 60 da Figura 3.48, é observado o início do desvio entre o desempenho com as três misturas. Embora a altura de elevação nessa fração seja praticamente a mesma, os padrões de escoamento começam a se diferenciar. No ponto IM 58 é observado o padrão *Gas Pocket Flow*, enquanto no ponto IM 59 esse padrão ainda não foi estabelecido. Para o ponto IM 60, mistura com menor tensão superficial, o padrão observado é o *Bubble Flow*.

Na fração de gás de 2,50 %, são observadas diferenças tanto no padrão de escoamento, quanto no desempenho para as três misturas. Nessa condição operacional, fica evidente a influência positiva da diminuição da tensão superficial no desempenho da bomba. Para ponto IM61, maior tensão superficial, a bomba está praticamente no ponto de *Gas Locking* e o padrão de escoamento observado é o *Segregated Flow*. No ponto IM 62, a bomba gera uma pressão intermediária e o padrão observado é o início do *Segregated Flow*. Finalmente, a menor degradação, ponto IM 63, é acompanhada do padrão *Gas Pocket Flow*.

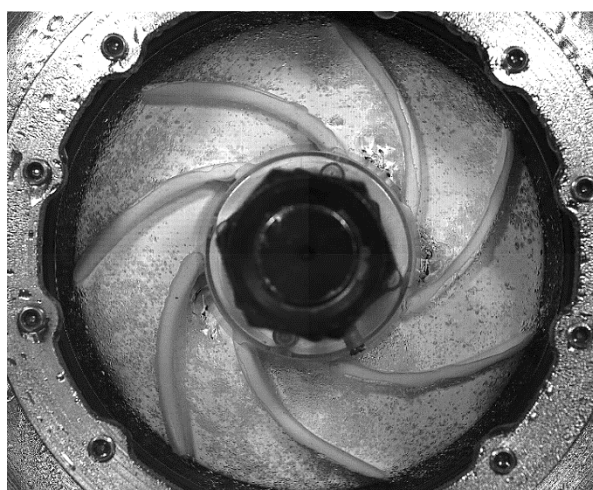




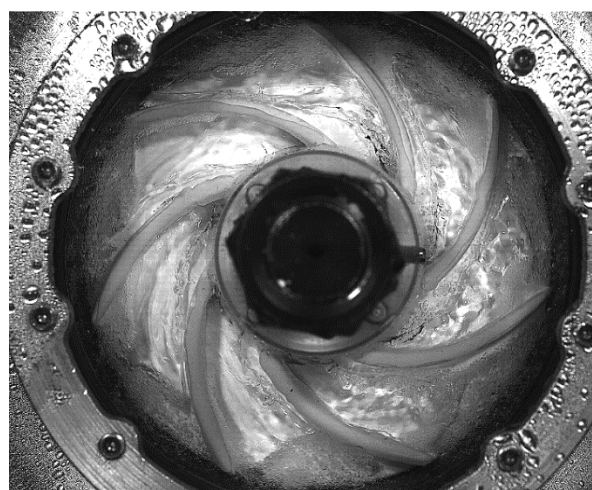
IM58



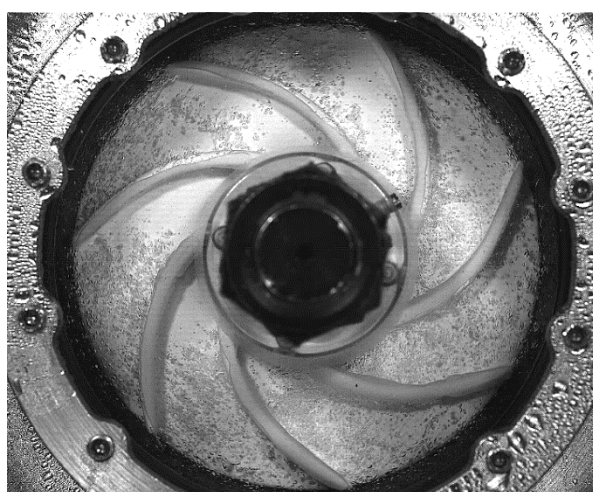
IM61



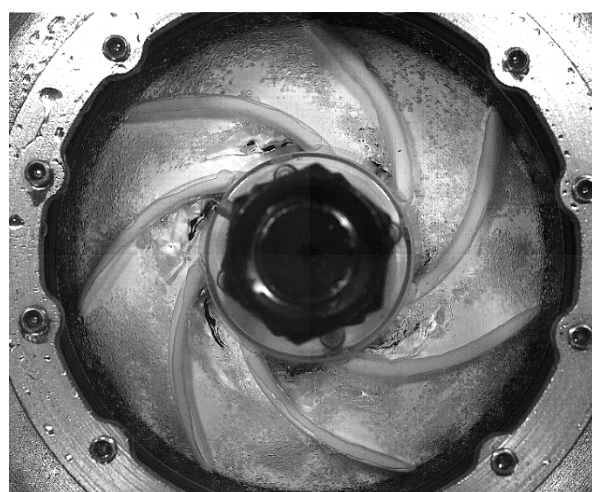
IM59



IM62



IM60



IM63

Figura 3.48 – Visualização do escoamento para a bomba protótipo operando mistura bifásica com água-ar, Fluido 1-ar e Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg/h}$



O ponto IM 58 até o ponto IM 63 são mostrados no Vídeo 42 até o Vídeo 47, respectivamente.

Baseado nesses resultados, fica evidente que o aumento da tolerância da bomba à presença de gás está diretamente relacionado com a mudança do padrão de escoamento no impelidor. A redução da tensão superficial dificulta a coalescência das bolhas e retarda a transição entre as fases, fazendo com que ela ocorra para frações de gás mais elevadas.

## 4 ESTUDO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE BCSS

Este capítulo apresenta os resultados de um estudo experimentalmente sobre diferentes aspectos que influenciam a operação de BCSSs. Para o escoamento monofásico, é investigada a degradação do desempenho da bomba em função da viscosidade do fluido. Já para o escoamento bifásico gás-líquido, além viscosidade, são estudados os efeitos da rotação, pressão de sucção, fração de gás e inclinação da instalação na capacidade de elevação da BCS.

O capítulo é organizado em duas seções. Inicialmente, é apresentado o programa experimental, em que são descritos o aparato experimental, os fluidos de trabalho, procedimentos e a matriz de testes. Na segunda seção, são apresentados e discutidos os resultados experimentais de desempenho da BCS.

### 4.1 Programa Experimental

#### 4.1.1 Montagem Experimental B

Para a realização dos testes, foi projetado e construído um aparato experimental totalmente novo. As facilidades experimentais foram montadas no Laboratório Experimental de Petróleo “Kelsen Valente” (LABPETRO) do Centro de Estudos de Petróleo (CEPETRO). Esse aparato experimental, chamado de Montagem Experimental B, é apresentado de forma esquemática na Figura 4.1.

O circuito de teste foi projetado para operar com fluido viscoso ou água. Na operação com fluido viscoso, o armazenamento é feito no tanque horizontal 1 e utiliza-se uma bomba *booster* de deslocamento positivo. Nos testes com água, são utilizados o tanque 2 e uma bomba *booster* centrífuga. As bombas *booster* têm como função controlar a pressão na sucção da BCS, sendo esse ajuste realizado atuando-se nos variadores de frequências (VSD) que acionam os motores elétricos. Os VSDs são ligados à instrumentação, permitindo seu acionamento de forma remota.

Após ser bombeado pela *booster*, caso seja necessário, o fluido passa pelo trocador de calor casco-tubo para o controle de temperatura. A bomba de calor que compõe o sistema de controle de temperatura é capaz resfriar ou aquecer o fluido na faixa de 5 a 56 °C. A vazão de

fluido que passa pelo controle trocador de calor é ajustada pela abertura da válvula globo eletropneumática V3.

Nos testes bifásicos, o ar ambiente é comprimido e injetado na corrente de líquido na entrada do *skid* de testes. A vazão de gás injetada é controlada pela válvula globo elétrica V2. A mistura gás-líquido passa pela seção de visualização, é bombeada pela BCS e retorna ao tanque, onde é feita a separação gravitacional das fases. O controle de vazão da mistura, a jusante da BCS, é realizado pela válvula globo eletropneumática V1.

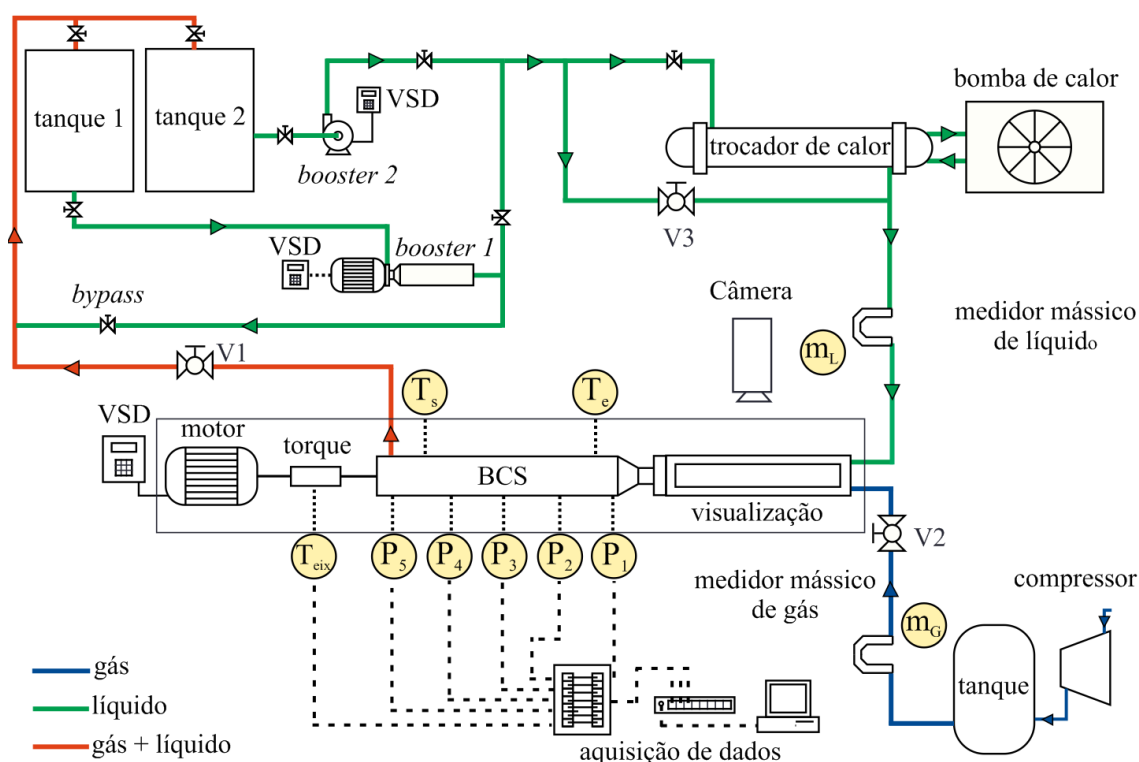


Figura 4.1 – Layout da Montagem Experimental B.

O *skid* de testes é composto pela seção de visualização, BCS, mancais, motor elétrico e unidade hidráulica. Nessa montagem a BCS é acionada pela descarga, diferentemente da configuração convencional em que o acionamento é feito pela sucção. Isso evita a formação de um espaço anular, devido a passagem do eixo de acionamento, e facilita a visualização do escoamento. Para permitir que a BCS fosse acionada pela descarga, foi necessário desenvolver um mancal que sustentasse o empuxo axial gerado pela bomba. A solução encontrada foi projetar um mancal acoplado diretamente a descarga. Todo esse conjunto é montado sobre uma plataforma que, por meio de um atuador hidráulico, pode rotacionar, permitindo a operação da BCS em desde a posição horizontal até a vertical. O projeto do *skid* é apresentado na Figura 4.2 e o *skid* construído, montado na posição vertical, é mostrado na Figura 4.3.

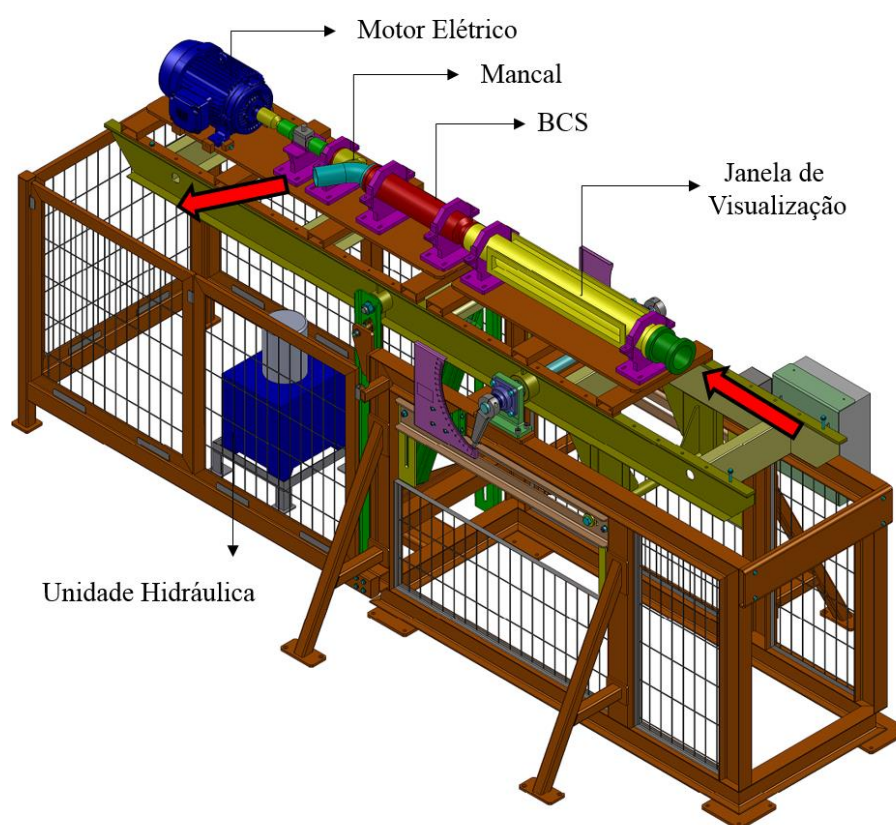


Figura 4.2 – Projeto do *Skid* de testes de BCSs.



Figura 4.3 – *Skid* de testes montados na configuração vertical.

A Tabela 4.1 apresenta os equipamentos utilizados na Montagem Experimental B. No APÊNDICE D são mostrados em detalhes o projeto do *skid* de testes e os equipamentos utilizando nessa montagem experimental.

Tabela 4.1 – Equipamentos utilizados na Montagem Experimental B.

Equipamento	Fabricante/Modelo	Características
Termochiller	Carrier AQUASNAP 30RH20	Capacidade de refrigeração 61,4 kW, aquecimento 62,5kW, temperatura do fluido de trabalho de 5 a 56 °C.
Trocado de calor	FYTERM Ø 254x1200	Tipo casco-tubos, capacidade térmica 37000 kcal/h e área de troca de 7,18 m².
Bomba booster 1	Netzsch/Nemo Modelo NM	Bomba de cavidade progressivas, vazão de projeto de 100 m³/h, pressão de 8 bar e viscosidade de 1000 cP.
Motor elétrico da bomba booster 1	WEG W22 Plus	Trifásico 220, 380, 440 V/122,70,6 ,61 A, 60 Hz, 37 kW (50 CV), 1170 rpm.
Bomba booster 2	Schneider – Série ME-3 (C156)	Bomba centrífuga, com 3 estágios. Vazão de 33 a 51 m³/h e pressão de 1294 a 981 kPa.
Motor elétrico da bomba booster 2	WEG	Trifásico 220, 380, 440 V/72, 41 ,36 A, 60 Hz, 22 kW (30 CV), 3530 rpm.
Variador de frequência	WEG GFW-11	Trifásico, 380/480 V, 60 Hz, micro processado com display digital.
Variador de frequência	WEG GFW-09	Trifásico de 380/480 V, 60 Hz, micro processado com display digital.
Válvula globo V1	Fischer	Válvula de controle globo, 3”, posicionador com controle eletropneumático 4-20 mA.
Válvula globo V2	Spirax Sarco	Válvula de controle globo, 3”, posicionador com controle eletropneumático 4-20 mA.
Válvula globo V3	Elan	Válvula de controle globo, 1/2”, posicionador com controle elétrico 4-20 mA.
Unidade hidráulica	MDR	Unidade hidráulica com potência de 2 CV, pressão de trabalho de 65 bar.

Tanque 1	-	Tanque cilíndrico horizontal em polipropileno, capacidade de 8 m <sup>3</sup> .
Tanque 2	-	Tanque cilíndrico vertical em polipropileno, capacidade de 2 m <sup>3</sup> .

#### 4.1.2 BCS GN5200

A BCS escolhida para os testes foi o modelo GN5200, série 540, de três estágios. A escolha desse modelo deve-se a sua ampla utilização na indústria e também pelas limitações de montagem em condições de laboratório. A BCS GN5200, operando a 3500 rpm, apresenta no BEP vazão de 5511 bbl/d (36,5 m<sup>3</sup>/h) e altura de elevação de 28,3 ft (8,6 m), por estágio. Os impelidores são do tipo fluxo misto e possuem velocidade específica de 1,32, conforme Equação (2.18). A Figura 4.4 apresenta a curva de desempenho da BCS GN5200, conforme o catálogo do fabricante.

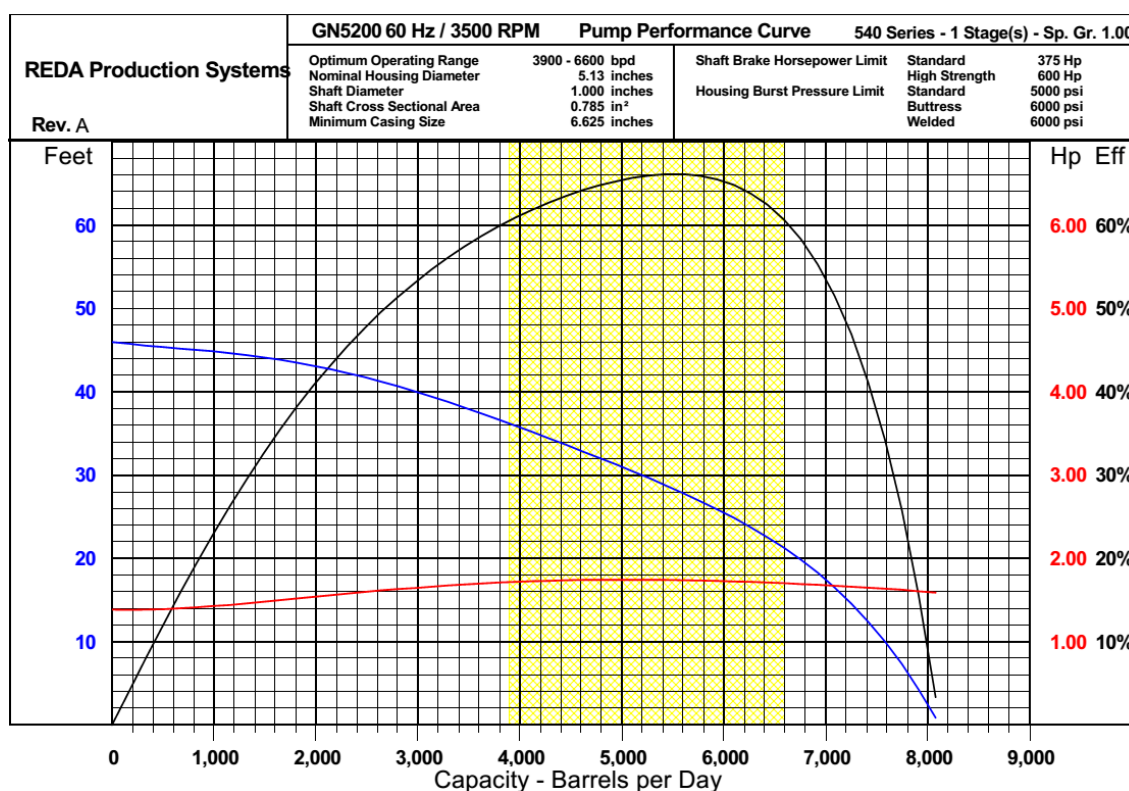


Figura 4.4 – Desempenho da BCS GN5200 operando a 3500 rpm conforme catálogo do fabricante.

As características geométricas do estágio da BCS GN5200 são apresentadas na Figura 4.5, Tabela 4.2 e Tabela 4.3.



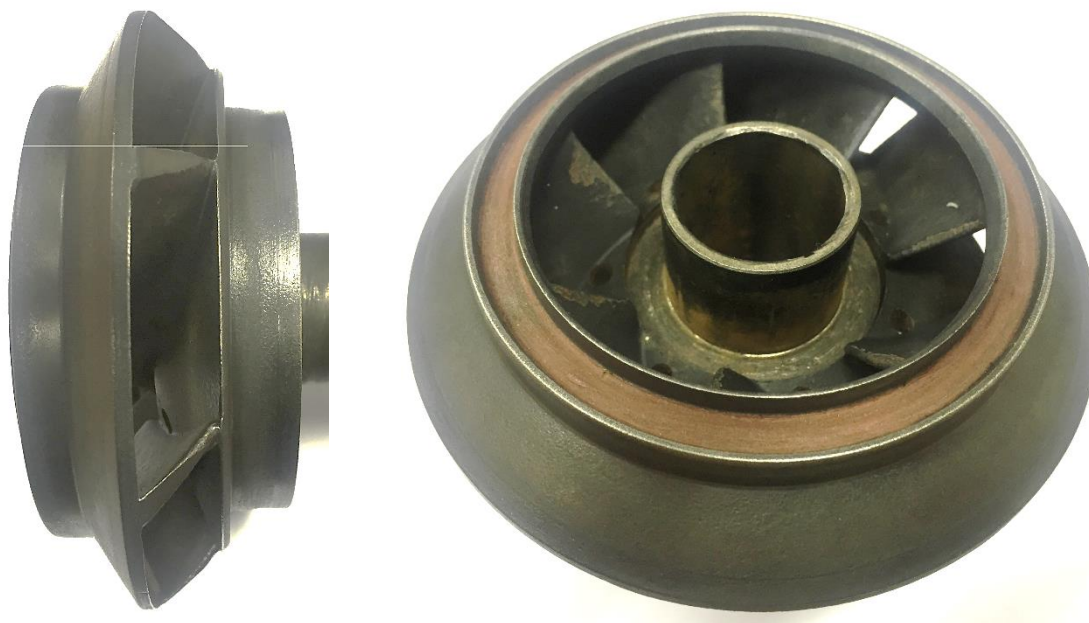


Figura 4.5 – Impelidor da BCS GN5200.

Tabela 4.2 – Características geométricas do impelidor (Ofuchi, 2015).

Parâmetro	Valor
Número de pás	7
Espessura da pá na entrada [mm]	1,8
Espessura da pá na saída [mm]	2,0
Diâmetro interno de entrada [mm]	30,2
Diâmetro externo de entrada [mm]	65,3
Diâmetro interno de saída [mm]	79,9
Diâmetro externo de saída [mm]	93,3
Altura da pá na entrada [mm]	22,6
Altura da pá na saída [mm]	15,4
Ângulo de entrada	16°
Ângulo de saída	35°

A BCS GN5200 foi instrumentada de forma a quantificar-se o ganho de energia fornecido ao fluido por cada um dos estágios. O estágio intermediário, também, foi instrumentado, possibilitando a medição do diferencial de pressão através do impelidor e do estator. A Figura 4.6 apresenta os pontos de medição de pressão na BCS.

Tabela 4.3 – Características geométricas do estator (Ofuchi, 2015).

Parâmetro	Valor
Número de pás	7
Espessura da pá na entrada [mm]	3,4
Espessura da pá na saída [mm]	4,3
Diâmetro interno de entrada [mm]	79,9
Diâmetro externo de entrada [mm]	93,3
Diâmetro interno de saída [mm]	30,2
Diâmetro externo de saída[mm]	65,3
Altura da pá na entrada [mm]	14,5
Altura da pá na saída [mm]	17,8
Ângulo de entrada	31
Ângulo de saída	90

O ponto  $P1$  refere-se à sucção da BCS, enquanto, no ponto  $P2$ , é medida a pressão na saída do primeiro estágio. Assim, a diferença entre as pressões  $P2$  e  $P1$  indica o ganho de pressão fornecido ao fluido pelo primeiro estágio.

Os pontos  $P3$  e  $P4$  estão localizados nas saídas do Impelidor 2 e do Estator 2, respectivamente. Portanto, os diferenciais de pressão através do Impelidor 2 e Estator 2, são calculados pelas diferenças  $P3 - P2$  e  $P4 - P3$ , respectivamente. O ganho de pressão do segundo estágio é dado pela diferença entre  $P4$  e  $P2$ .

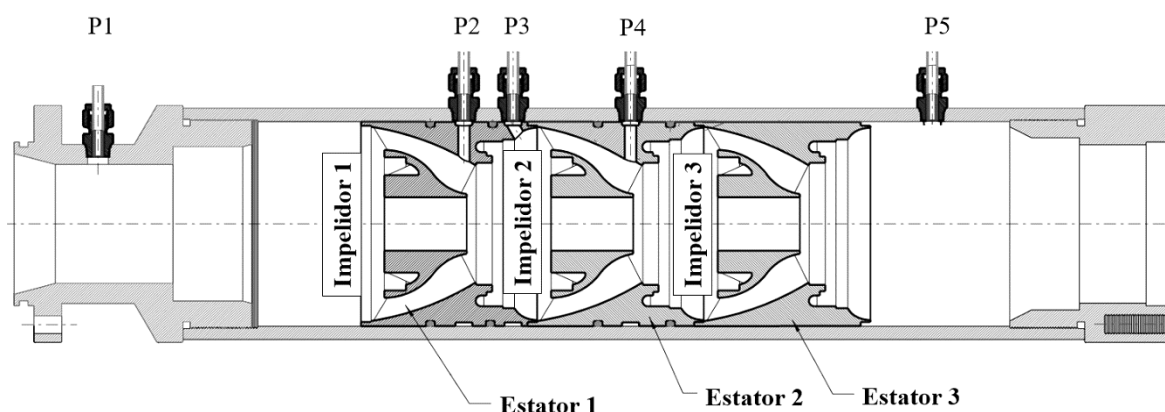


Figura 4.6 – Instrumentação da BCS GN5200.



No ponto  $P5$ , é medida a pressão de descarga da BCS. A pressão gerada pelo estágio 3 é calculada pela diferença entre  $P5$  e  $P4$ . O ganho de pressão total da BCS é dado pela soma das pressões individuais de cada estágio, que é equivalente a diferença entre as pressões de descarga e sucção,  $P5 - P1$ .

A Figura 4.7 mostra as alterações realizadas nos Estatores 1 e 2, que permitem a instalação das tomadas de pressão na BCS. Essas alterações consistem em comunicar o interior dos estatores com a carcaça da bomba. A comunicação é realizada por meio de orifícios de 3 mm de diâmetro. Antes e depois de cada orifício, são usinados canais para a instalação de juntas. As juntas são responsáveis por vedar a comunicação entre as diferentes tomadas de pressão.

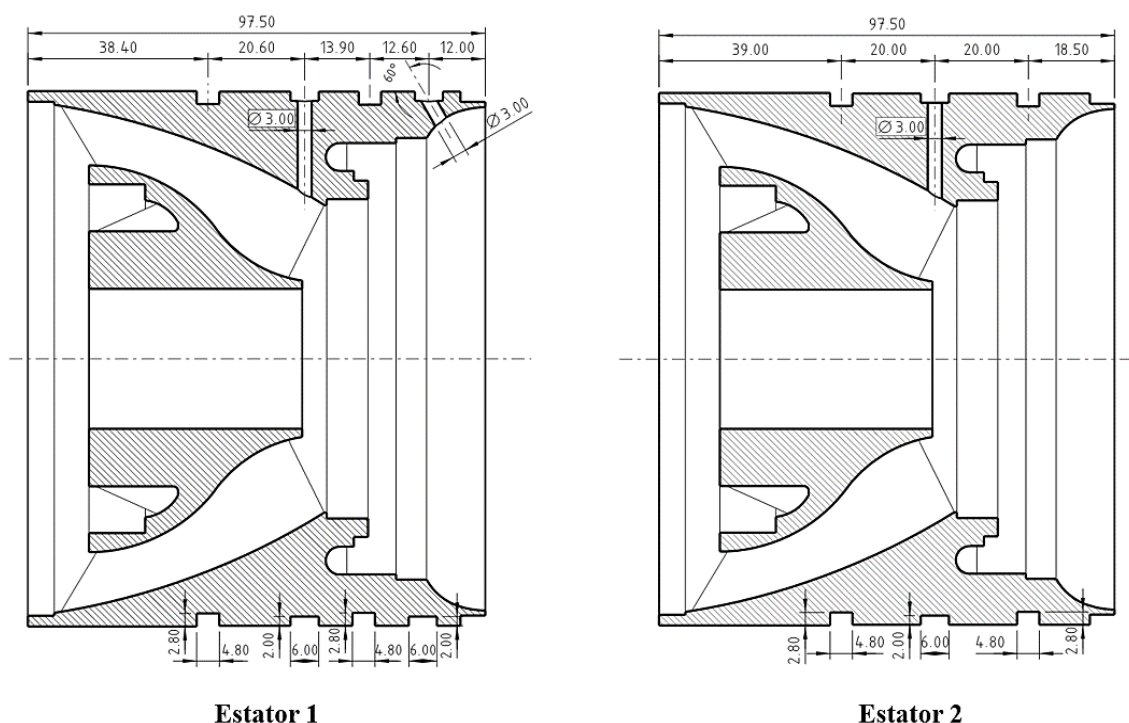


Figura 4.7 – Modificações realizadas nos estatores 1 e 2 (dimensões dadas em mm).

#### 4.1.3 Instrumentação e Sistema de Aquisição de Dados

Na Montagem Experimental B, são medidas todas as variáveis necessárias para o cálculo do desempenho da BCS. A seguir, são apresentados os detalhes da instrumentação e do sistema de aquisição de dados.

Além da instrumentação descrita para a medição de pressão, são instaladas termoresistências tipo PT100 na sucção e descarga da BCS. A medição na sucção é utilizada

como referência no controle de temperatura do fluido, enquanto a temperatura na descarga permite avaliar o aquecimento do fluido ao ser bombeado.

No eixo de acionamento, entre o motor elétrico e o mancal, é acoplado um transdutor de torque rotativo. Por meio dessa medida, é calculada a potência consumida pela BCS. Os parâmetros elétricos do motor, também, podem ser utilizados para o cálculo da potência de acionamento. No entanto, as elevadas incertezas associadas à medição da corrente elétrica e tensão, assim como a necessidade de calibração do motor elétrico, descartam a utilização dessa metodologia no presente estudo.

As vazões de líquido e gás são medidas utilizando medidores mássicos tipo Coriolis.

A Tabela 4.4 apresenta todas as variáveis medidas durante os experimentos e a Tabela 4.5 mostra a descrição dos instrumentos utilizados. No APÊNDICE B, são mostrados os procedimentos e as curvas de calibração dos instrumentos de medição. As incertezas associadas aos instrumentos e as variáveis de desempenho calculadas são apresentadas no APÊNDICE C.

Tabela 4.4 – Variáveis medidas no sistema de aquisição de dados Montagem Experimental B.

Variável	Definição	Unidade
$P_1$	Pressão na sucção	kPa
$P_2$	Pressão na saída do 1º estágio	kPa
$P_3$	Pressão na saída do 2º impelidor	kPa
$P_4$	Pressão na saída do 2º estator	kPa
$P_5$	Pressão na saída do 3º estágio	kPa
$T_e$	Temperatura na sucção	°C
$T_s$	Temperatura na descarga	°C
$\dot{m}_L$	Vazão mássica de líquido	kg/h
$\dot{m}_G$	Vazão mássica de gás	kg/h
$T_{eixo}$	Torque do motor	N.m
$\omega$	Rotação	rpm

O sistema de aquisição de dados e controle é composto de um microcomputador, módulos de aquisição de sinais, módulos de saída analógica e programa de processamento.

Nos módulos de aquisição, os sinais analógicos são recebidos dos instrumentos, condicionados e digitalizados. Os módulos de saída analógica de corrente ou tensão são utilizados para acionar remotamente os VSDs das bombas *booster* 1 e 2 e os posicionadores das válvulas globo V1, V2 e V3.

Tabela 4.5 – Instrumentação utilizada na Montagem Experimental B.

Instrumento	Variável	Modelo	Características
Transdutores de pressão	$P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$	Rosemount Modelo 2088	Medidor de pressão manométrica, calibração 0 – 2000 kPa, saída analógica de 4 – 20 mA.
Sensores de temperatura	$T_e$ $T_s$	PT-100	Sensor de temperatura RTD com faixa de operação 0 – 100 °C.
Vazão mássica de líquido	$\dot{m}_L$	Micro Motion Modelo DS300	Tipo Coriolis de 3”, saída analógica 4-20 mA, faixa de operação 0 – 190500 kg/h.
Vazão mássica de gás	$\dot{m}_G$	Micro Motion Modelo CMF	Tipo Coriolis de 1/2”, sinal, saída analógica de 4 – 20 mA, faixa de operação 0 – 310 kg/h.
Torquímetro	$T_{eixo}$	HBM T20WN/50NM	Sensor de torque dinâmico e rotação com condicionador de sinais, capacidade de 50 N.m e rotação máxima de 6000 rpm.
Tacômetro	$\omega$	MDT – 2238A	Digital foto/contato, operação de 2.4 – 99999 rpm ( <i>foto</i> ).
Transdutor de temperatura	ECIL APAQ-LR		Transmissor resistência/corrente saída analógica de 4 – 20 mA.
Aquisição de sinais	National Instruments NI 9172		Chassis para módulos de aquisição de sinais com saída USB.
Módulos de aquisição	National Instruments NI 9203		8 canais de entrada para sinais de 4 – 20 mA
Módulo de saída analógica	National Instruments NI 9265		Saída de corrente analógica, 4 canais, 0 – 20 mA.
Módulo de saída analógica	National Instruments NI 9263		Saída de tensão analógica, 4 canais, -10 – +10 V.

Utilizando-se o software LabView® 2011, foi desenvolvido uma rotina para monitorar a instrumentação e controlar as variáveis durante os testes. Na interface gráfica do programa, Figura 4.8, são mostrados, em tempo real, os sinais oriundos dos instrumentos de medição e o comportamento das curvas de desempenho que estão sendo obtidas. Esses sinais são processados, apresentados ao usuário na forma de média ou gráficos e salvos em arquivos de texto com extensão txt. Por meio dessa interface é possível, também, controlar a rotação das *boosters* e a abertura das válvulas automatizadas V1, V2 e V3.

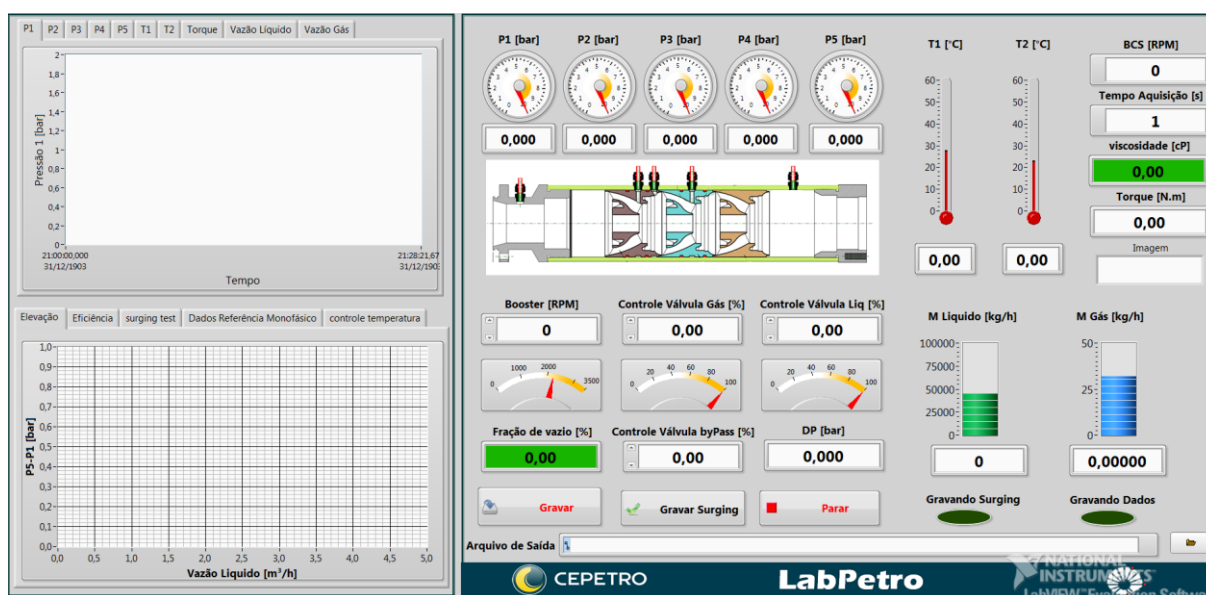


Figura 4.8 – Interface gráfica do programa de monitoramento e aquisição de dados.

#### 4.1.4 Equipamentos de Visualização

Um dos objetivos desse estudo é verificar a existência de uma relação entre o padrão de escoamento gás-líquido na sucção e o desempenho da BCS. Para visualizar o escoamento, foi escolhida a técnica de filmagem de alta velocidade. A câmera utilizada foi o modelo *Motion Pro X3*, fabricada pela RedLake, que possui taxa de aquisição de 1000 fps na resolução máxima de 1280x1024, chegando a 64000 fps em resoluções inferiores.

A filmagem do escoamento é feita em uma seção de visualização montada na sucção da BCS. A seção de visualização é iluminada na fase oposta àquela em que é posicionada a câmera.

Em todos os testes, utilizou-se taxa de 1000 fps e aquisição durante 0,1 segundo, resultando em 100 imagens para determinada condição operacional.

### 4.1.5 Fluidos de Trabalho

O estudo sobre a influência da viscosidade no desempenho da BCS GN5200 foi conduzido utilizando-se dois fluidos de trabalho: glicerina bidestilada e solução de água em glicerina bidestilada. A seguir, é mostrada a caracterização das propriedades desses dois fluidos.

A glicerina bidestilada foi escolhida pela facilidade de manuseio e considerável variação da viscosidade em função da temperatura. Isso possibilita testes em diferentes viscosidades por meio do controle da temperatura, utilizando-se o mesmo fluido.

As caracterizações reológicas dos fluidos, assim como as medições da massa específica e tensão superficial, foram realizadas utilizando-se os procedimentos descritos na seção 3.2.4.

O comportamento reológico da glicerina foi avaliado sob varredura de tensão de cisalhamento na faixa de  $25 - 500 \text{ s}^{-1}$ , nos limites operacionais de 5 e 60 °C. Os resultados da curva de fluxo são apresentados na Figura 4.9. Os ajustes lineares dos dados medidos com coeficientes de determinação  $R^2 \approx 1$  revelam que a glicerina apresenta comportamento newtoniano nas temperaturas limites testadas.

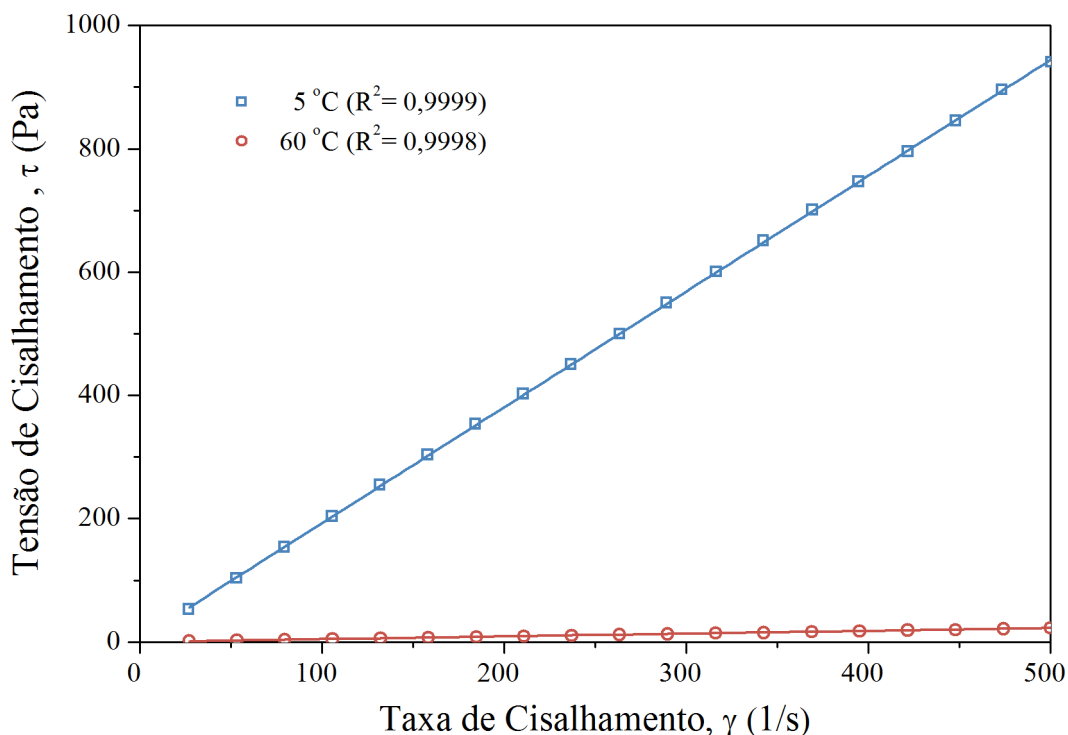


Figura 4.9 – Comportamento reológico da glicerina nas temperaturas de 5 e 60 °C.

A variação da viscosidade da glicerina em função da temperatura foi medida fixando-se a taxa de cisalhamento em  $100 \text{ s}^{-1}$  e variando-se a temperatura numa taxa decrescente de  $0,4 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , de  $60$  até  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . A Figura 4.10 mostra a variação da viscosidade em função da temperatura e o ajuste exponencial dos dados. Considerando-se os limites de temperatura de  $5$  a  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , é possível obter-se a faixa de viscosidades de  $1915$  a  $76 \text{ cP}$ , respectivamente.

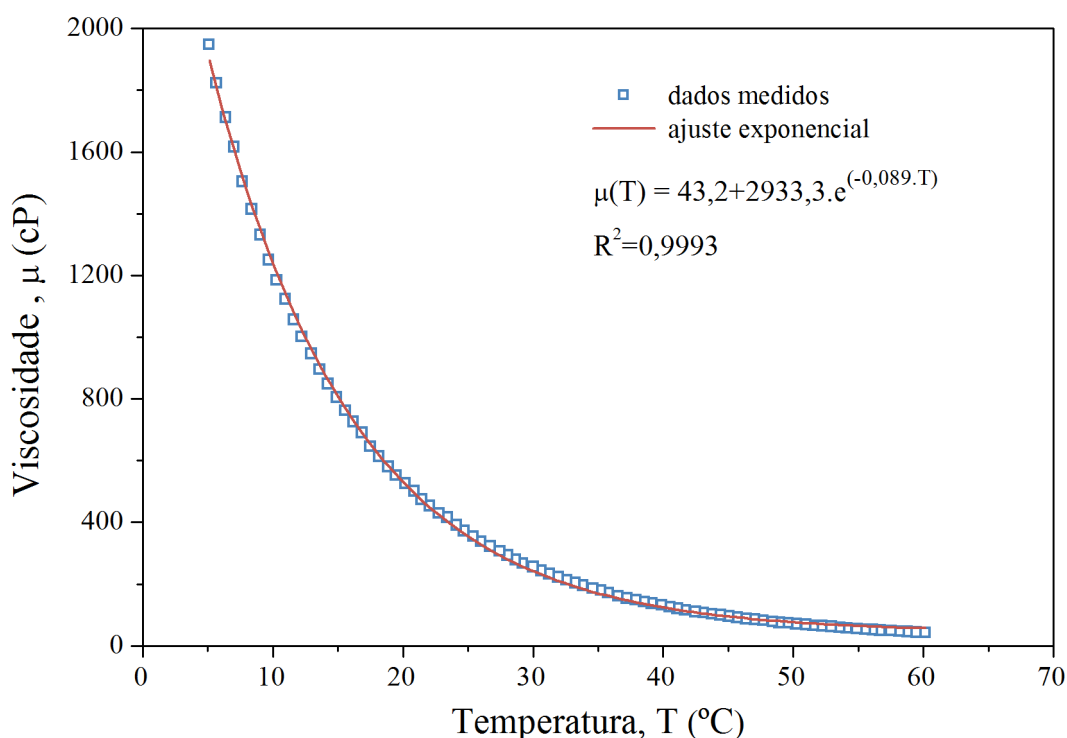


Figura 4.10 – Viscosidade da glicerina em função da temperatura.

Na Figura 4.11, são apresentados os valores medidos para a massa específica da glicerina na faixa de temperatura de  $5$  a  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Além dos dados medidos, é mostrado o ajuste linear da massa específica em função da temperatura e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

A Figura 4.12 apresenta os valores medidos para a tensão superficial glicerina/ar na faixa de temperatura de  $5$  a  $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , o ajuste linear e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

Devido ao aquecimento do fluido de trabalho ao ser bombeado pela BCS, uma propriedade que, também, deve ser caracterizada é o calor específico. A medida dessa propriedade foi realizada em um Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC, TA Instruments, modelo Q2000). Uma massa de aproximadamente  $10 \text{ mg}$  foi pesada e hermeticamente lacrada em um porta amostras de alumínio para a medição. As medidas foram realizadas na faixa de  $12$  a  $62 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , com taxa de aquecimento de  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , em atmosfera controlada de nitrogênio.

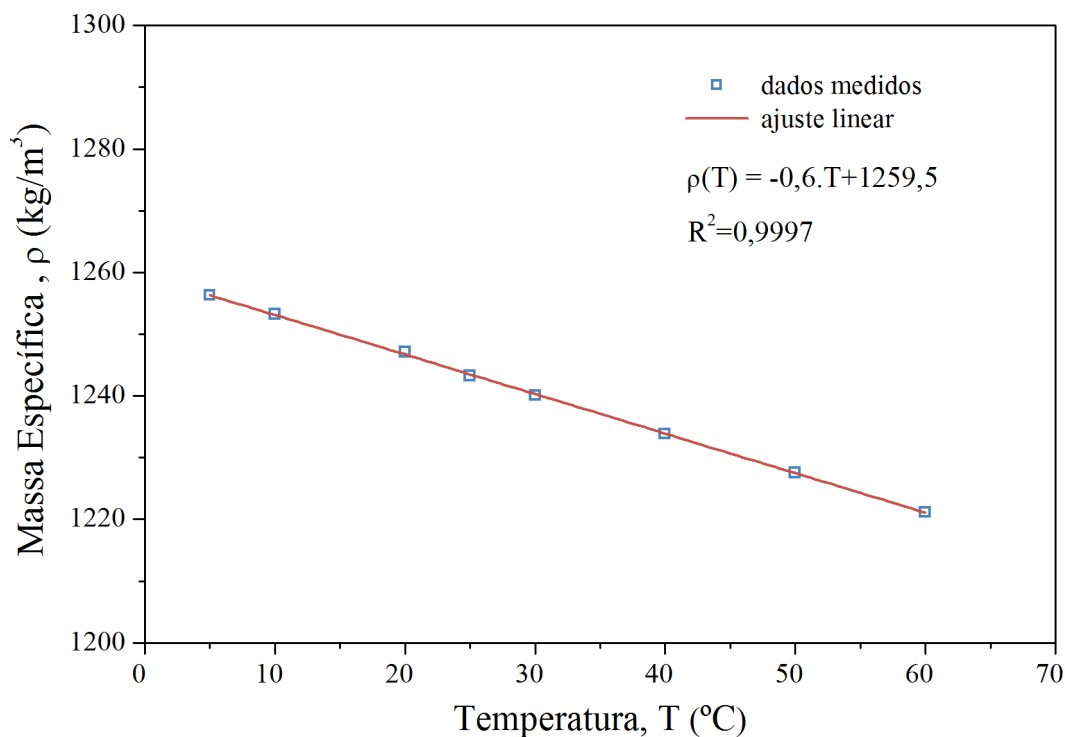


Figura 4.11 – Massa específica da glicerina em função da temperatura.

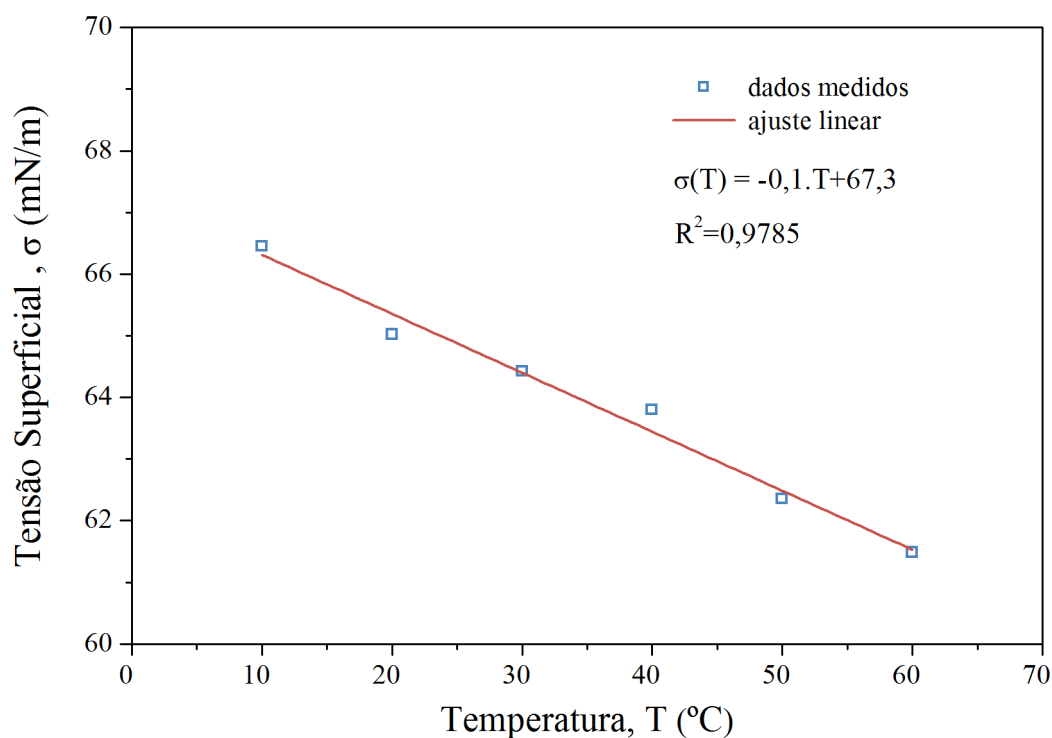


Figura 4.12 – Tensão superficial glicerina/ar em função da temperatura.

A Figura 4.13 apresenta os valores medidos do calor específico da glicerina em função da temperatura, o ajuste linear e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

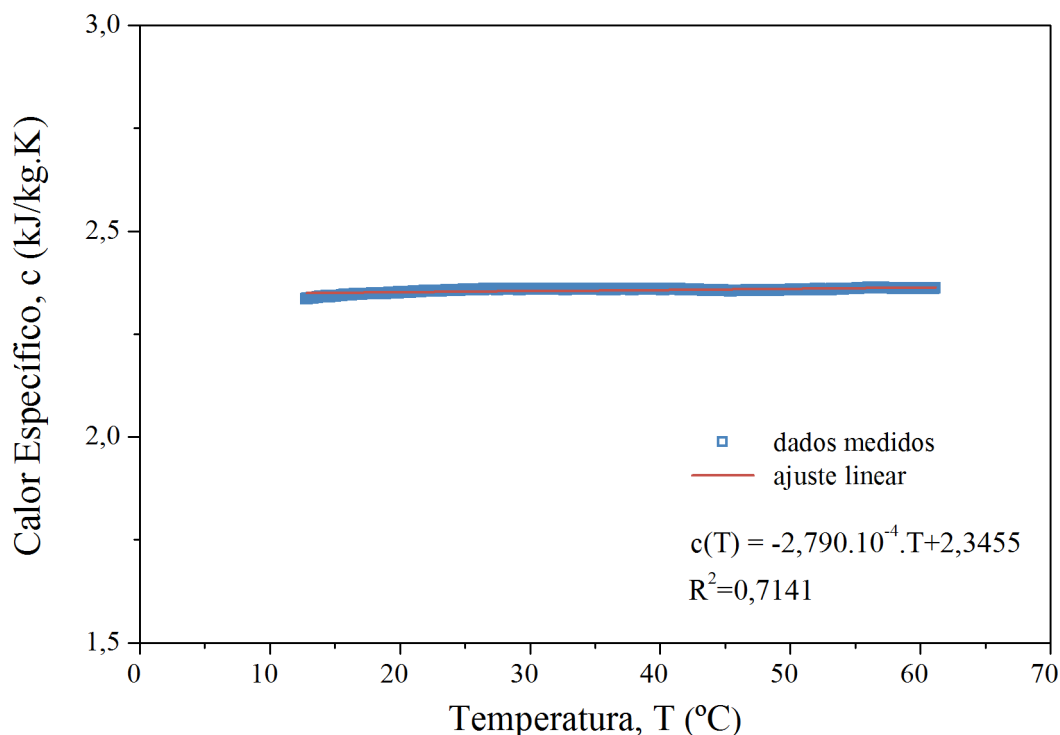


Figura 4.13 – Calor específico da glicerina em função da temperatura.

Os testes utilizando-se glicerina como fluido de trabalho foram limitados a temperatura máxima de 50 °C, resultando na viscosidade mínima de 76 cP. Com o objetivo de atingir menores valores de viscosidade, utilizou-se uma solução de água em glicerina. A solução utilizada possui concentração mássica de água de aproximadamente 30 %.

A Figura 4.14 apresenta o comportamento reológico da solução de água em glicerina. As medições foram realizadas sob varredura de tensão de cisalhamento na faixa de 25 – 500  $s^{-1}$ , nos limites operacionais de 10 e 30 °C. Os ajustes lineares dos dados medidos com coeficientes de determinação  $R^2 \approx 1$  revelam que a solução de água em glicerina apresenta comportamento newtoniano.

Na Figura 4.15, é apresentada a variação da viscosidade da solução em função da temperatura. Considerando-se os limites de temperatura de 10 a 30 °C, é possível obter-se a faixa de viscosidades de 33 a 11 cP, respectivamente.

As variações da massa específica e da tensão superficial em função da temperatura são mostradas na Figura 4.16 e Figura 4.17, respectivamente.



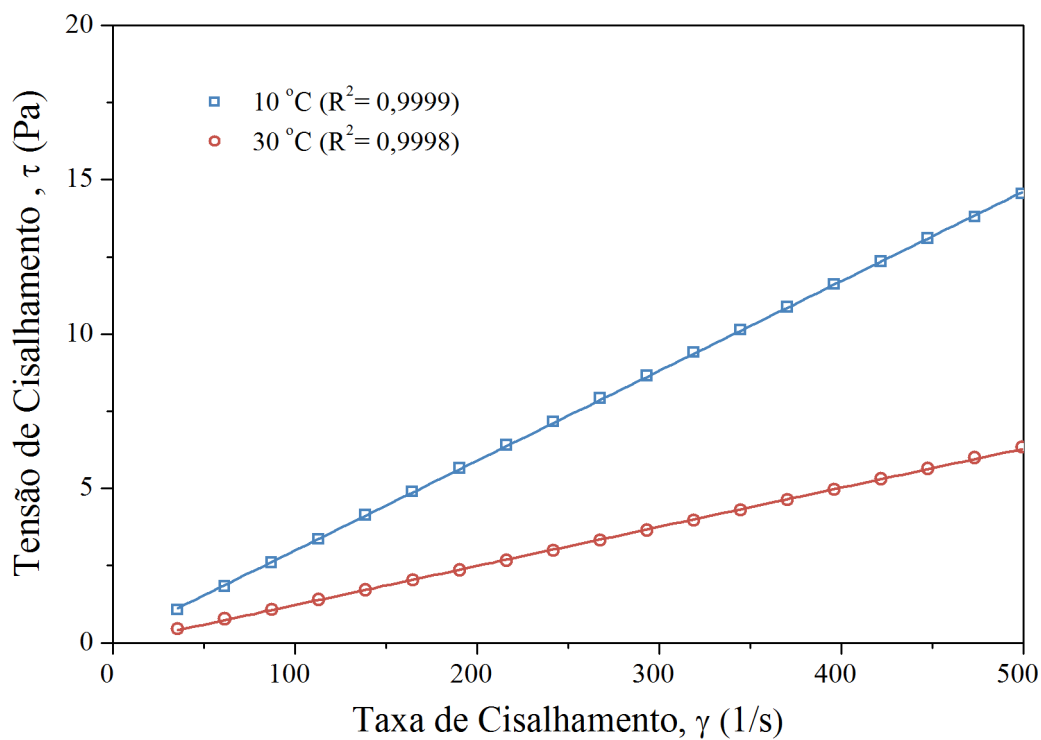


Figura 4.14 – Comportamento reológico da solução de água em glicerina nas temperaturas de 10 e 30 °C.

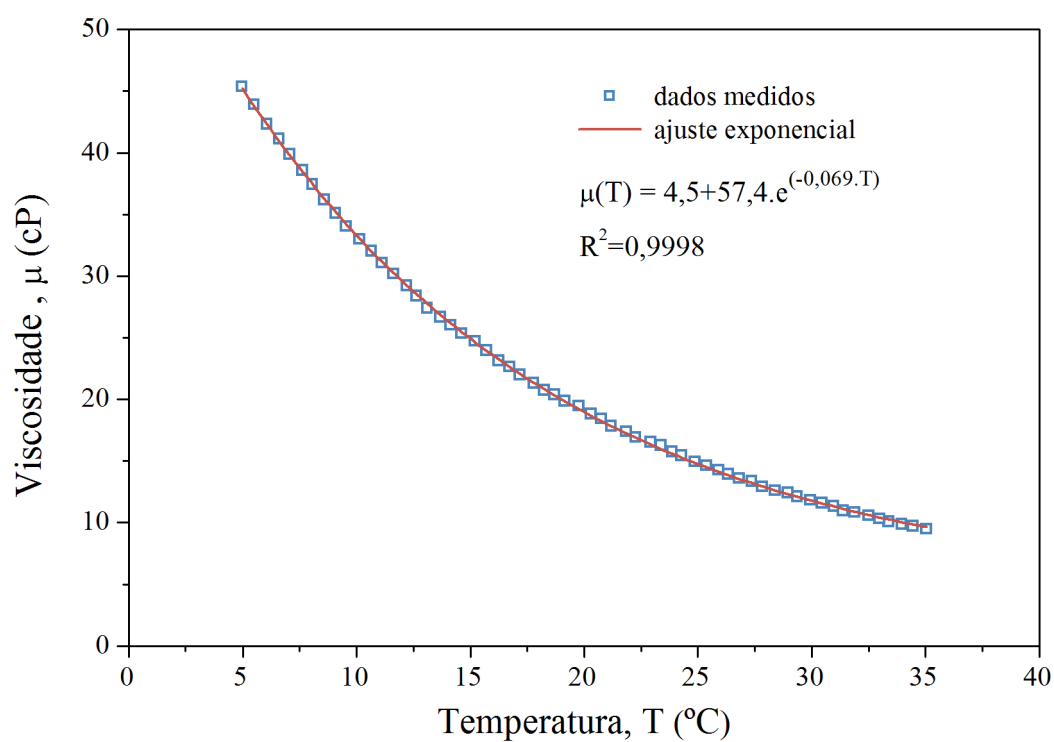


Figura 4.15 – Viscosidade da solução de água em glicerina em função da temperatura.

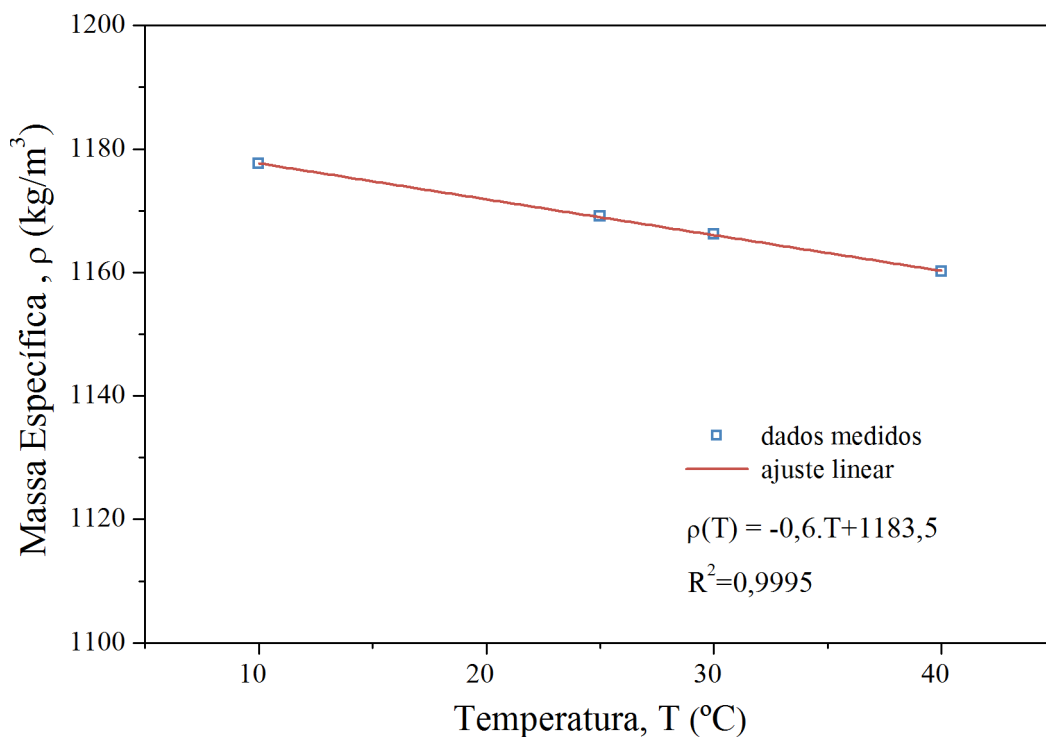


Figura 4.16 – Massa específica da solução de água em glicerina em função da temperatura.

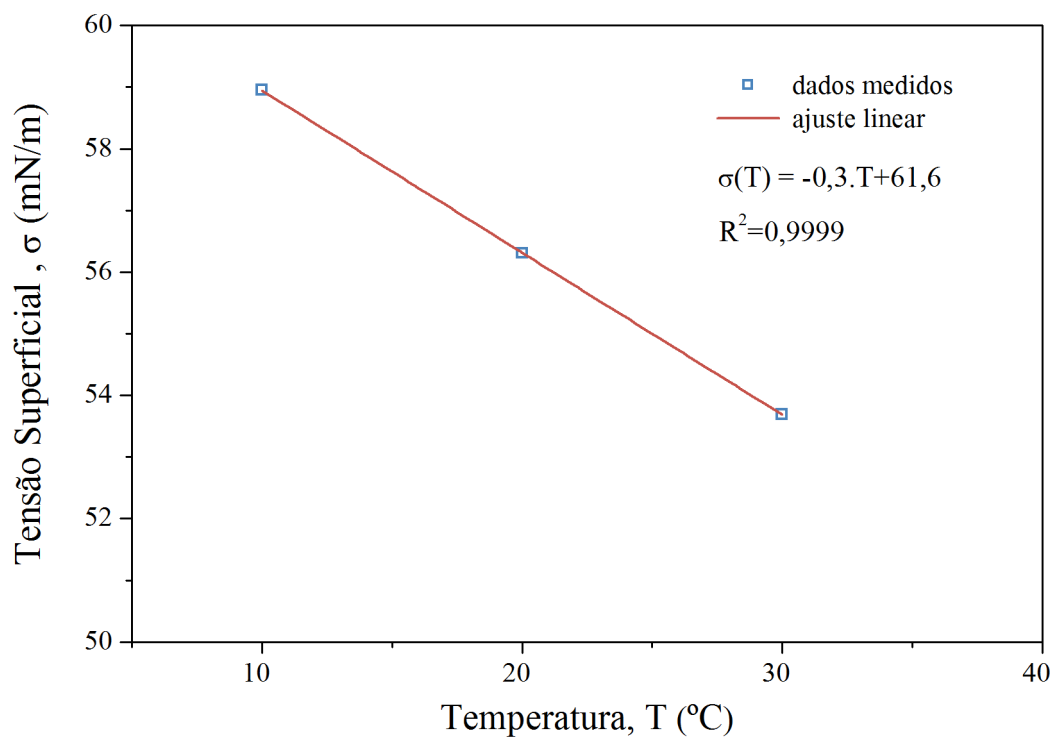


Figura 4.17 – Tensão superficial da solução de água e glicerina e o ar em função da temperatura.

### 4.1.6 Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais adotados nos testes da BCS GN5200 são os mesmos utilizados nos testes do protótipo de visualização. Esses procedimentos são descritos na seção 3.2.5.

### 4.1.7 Matriz de Testes

Os testes experimentais foram planejados e conduzidos com o objetivo de investigar os principais aspectos que afetam a operações de BCSs. A matriz de testes é proposta para avaliar a influência dos seguintes parâmetros no desempenho da BCS: rotação, pressão de sucção, fração de gás, viscosidade do líquido e inclinação da instalação.

Inicialmente, foram realizados testes preliminares com água para o comissionamento da instrumentação e análise da repetibilidade dos resultados. Esses testes, também, foram utilizados para verificar a correta operação da BCS após as modificações realizadas nos estatores.

A seguir, são apresentadas as matrizes de testes monofásicos e bifásicos.

#### 4.1.7.1 Testes Monofásicos

Primeiramente, foram realizados testes monofásicos com água, nas rotações de 1800, 2400, 3000 e 3500 rpm e nas inclinações horizontal ( $\theta = 0^\circ$ ) e vertical ( $\theta = 90^\circ$ ). Os resultados desses testes servem como referência para os testes bifásicos, além de possibilitarem a avaliação das leis de similaridade.

Os testes monofásicos com fluido viscoso foram realizados utilizando-se glicerina e solução de água em glicerina, rotações de 1200 a 3500 rpm e diferentes viscosidades. A Tabela 4.6 apresenta a matriz de testes proposta para os testes de desempenho monofásico viscoso.

Os testes monofásicos com água e fluido viscoso resultam em uma matriz de 59 curvas de desempenho, totalizando mais de 1200 pontos experimentais coletados.

Tabela 4.6 – Matriz de testes monofásicos viscosos.

		Rotação [rpm]				
		1200	1800	2400	3000	3500
Viscosidade do Fluido de Trabalho [cP]	Glicerina	76	76	76	77	76
		115	115	115	115	114
		188	188	187	188	188
		251	250	250	250	251
		356	355	354	355	352
		465	468	467	472	471
		599	602	599	605	600
		823	840	833	838	836
		1057	1069	1058		
	Solução Água/Glicerina	-	33	34	34	33
			12	12	12	12

#### 4.1.7.1 Testes Bifásicos

Os testes bifásicos foram realizados adotando-se o procedimento de vazão de líquido constante. As vazões de líquido utilizadas nos testes são determinadas com base nos testes de desempenho monofásicos.

A Tabela 4.7 apresenta as vazões de referência utilizadas nos testes bifásicos de desempenho com a mistura água-ar.

Os testes bifásicos água/ar foram realizados nas rotações de 2400 a 3500 rpm, pressão de sucção de 200 a 800 kPa, vazões de líquido do BEP e  $\pm 25\%$  do BEP e inclinações de 0 e 90°. A Tabela 4.8 apresenta a matriz de testes completa.

Tabela 4.7 – Pontos de melhor eficiência e limites operacionais com água, BCS GN5200.

Rotação (rpm)	Vazão de Água (m³/h)		
	0,75.BEP	BEP	1,25.BEP
2400	20,5	27,4	34,2
3000	25,5	34	42,5
3500	30	40	50

Tabela 4.8 – Matriz de testes bifásicos água-ar.

<b>Rotação [rpm]</b>	<b>Pressão [kPa]</b>	<b>Vazões</b>
2400	200	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	400	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	600	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	800	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
3000	200	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	400	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	600	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	800	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
3500	200	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	400	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	600	0,75.BEP
		1,0.BEP
		1,25.BEP
	800	-
		1,0.BEP
		1,25.BEP

Os testes de desempenho bifásicos glicerina-ar foram realizados com viscosidade de 76 cP e rotações de 2400 e 3500 rpm. A Tabela 4.9 apresenta vazões de líquido utilizadas como referências para os testes bifásicos. Na Tabela 4.10, é apresentada a matriz de testes proposta.

Tabela 4.9 – Pontos de melhor eficiência e limites operacionais com fluido viscoso, BCS GN5200.

Rotação (rpm)	Vazão de Fluido Viscoso (m <sup>3</sup> /h)		
	0,8.BEP	BEP	1,2.BEP
2400	13,84	17,3	20,76
3500	21,66	27,08	32,50

Tabela 4.10 – Matriz de testes bifásicos água-ar.

Inclinação [graus]	Rotação [rpm]	Pressão [kPa]	Vazões
0	2400	200	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP
		600	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP
	3500	200	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP
		600	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP
90	2400	200	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP
		600	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP
	3500	200	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP
		600	0,8.BEP
			1,0.BEP
			1,2.BEP

Os testes bifásicos realizados com BCS GN5200 resultam em uma matriz com 93 curvas de desempenho, totalizando mais de 2200 pontos experimentais coletados. Em todos esses pontos, foi realizada a filmagem do escoamento, resultando em mais de 300 Gb de imagens. No ANEXO I, são apresentados os dados coletados em todos os testes da matriz experimental.

## 4.2 Resultados Experimentais e Discussões

Esta seção apresenta e discute os resultados experimentais de desempenho obtidos para a BCS GN5200. Inicialmente, são apresentados os resultados dos testes monofásicos com água e fluido viscoso, em seguida os resultados dos testes bifásicos com as misturas água-ar e fluido viscoso-ar.

### Testes Monofásicos com Água

As curvas características de elevação, potência e eficiência, para a BCS GN5200 de três estágios operando com água são apresentadas na Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20, respectivamente. Esses testes foram realizados na horizontal ( $\theta = 0^\circ$ ), portanto a altura de elevação é calculada desconsiderando-se os termos referentes a energia potencial gravitacional.

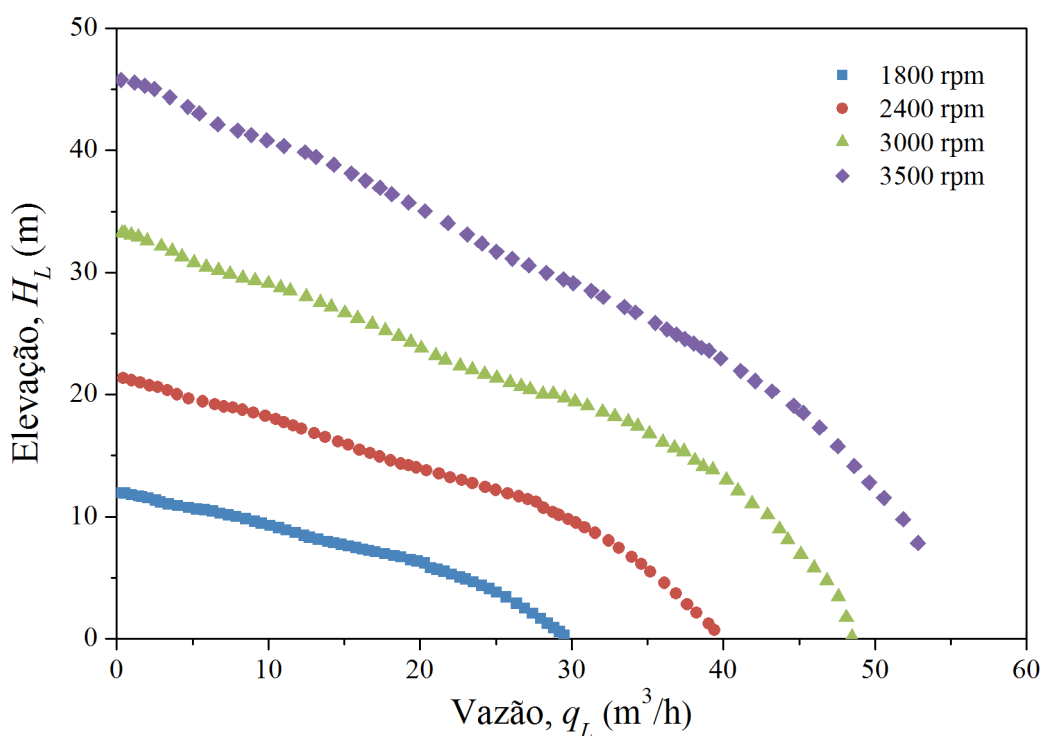


Figura 4.18 – Curvas características de elevação para a BCS GN5200 operando com água.

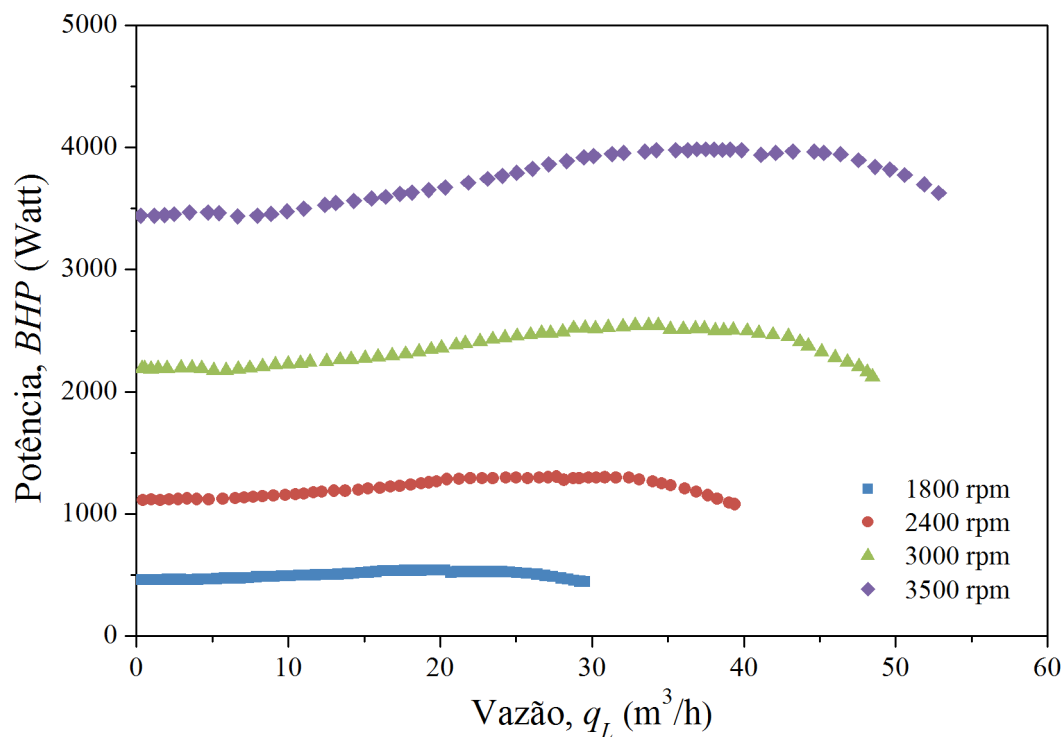


Figura 4.19 – Curvas características de potência para a BCS GN5200 operando com água.

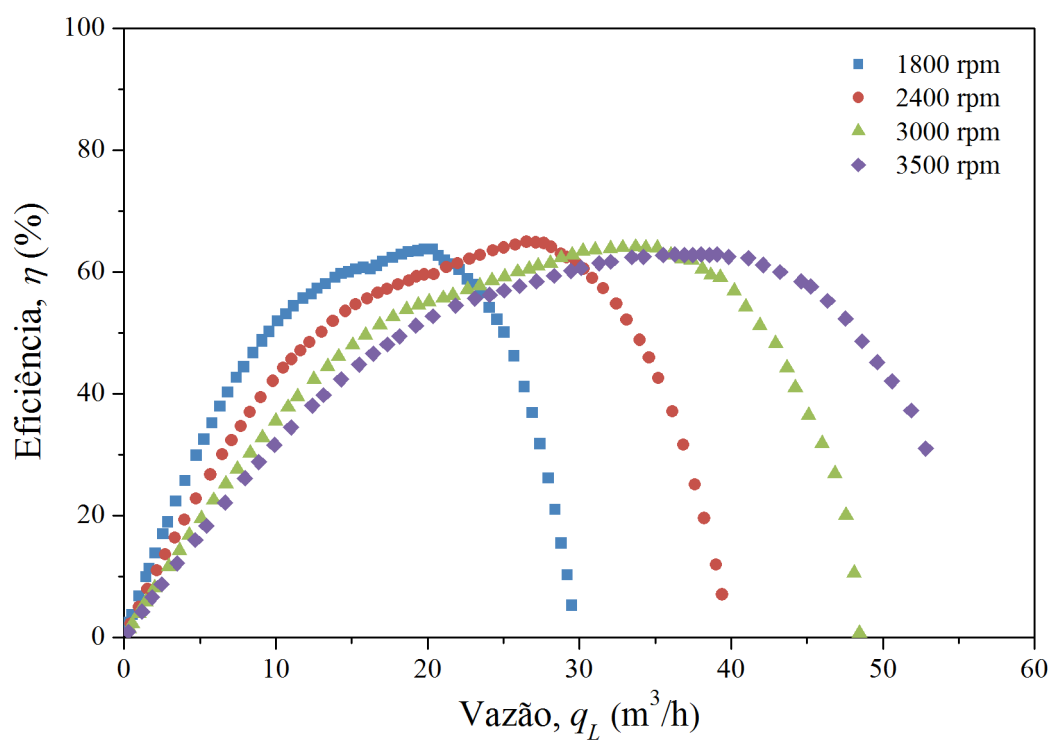


Figura 4.20 – Curvas características de eficiência para a BCS GN5200 operando com água.



A comparação entre as curvas características, de elevação e eficiência, medidas experimentalmente e as fornecidas pelo fabricante é apresentada na Figura 4.21. Esses resultados de desempenho referem-se à operação com água, na rotação nominal de 3500 rpm. A comparação revela uma boa concordância entre os resultados, indicando que as alterações realizadas na instrumentação dos estágios da BCS não descaracterizaram o desempenho original do equipamento.

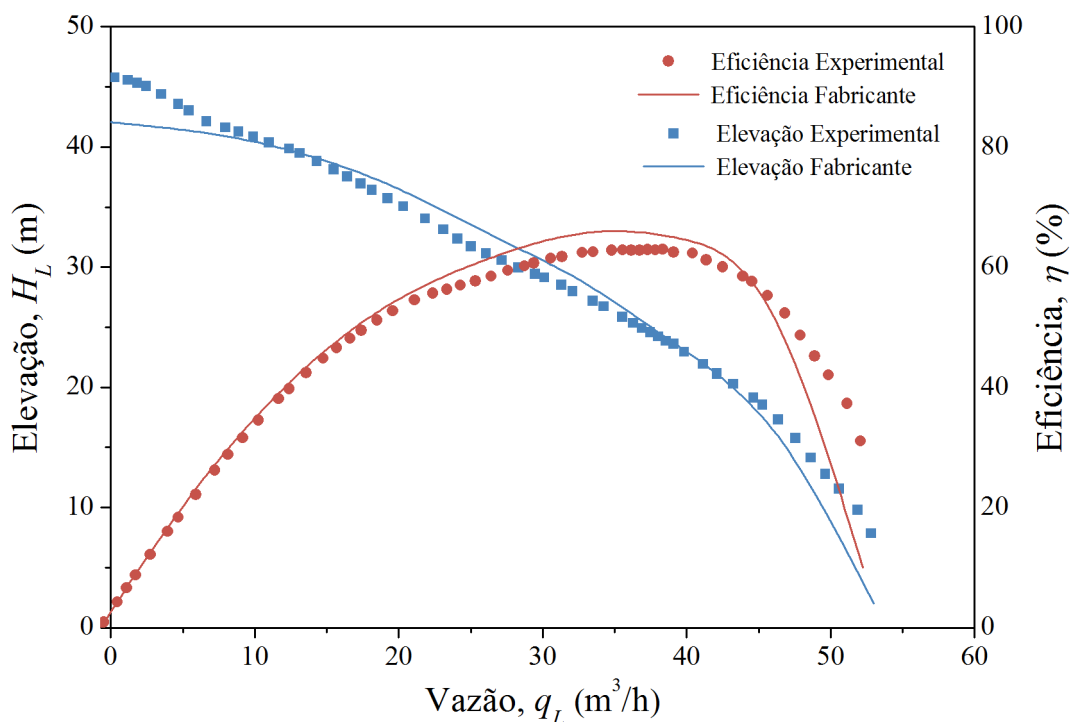


Figura 4.21 – Comparação entre o desempenho experimental e o previsto pelo fabricante para a BCS GN5200 operando com água na rotação de 3500 rpm.

As curvas características adimensionais da BCS GN5200 operando com água são apresentadas na Figura 4.22, Figura 4.23 e Figura 4.24. Com base nesses resultados, observa-se que os coeficientes de elevação, potência e eficiência são funções, apenas, do coeficiente de vazão, independentemente da rotação, conforme descrito pelas leis de similaridade nas Equações (2.15) e (2.16). Isto é válido para a operação da BCS com água e elevados números de Reynolds, em que os efeitos de inércia se sobrepõem aos efeitos viscosos.

A verificação das leis de similaridade aplicadas a BCS, em diferentes rotações, é uma garantia da correção das medidas realizadas, assim como uma verificação complementar da operação adequada da BCS, após as modificações realizadas nos estatores.

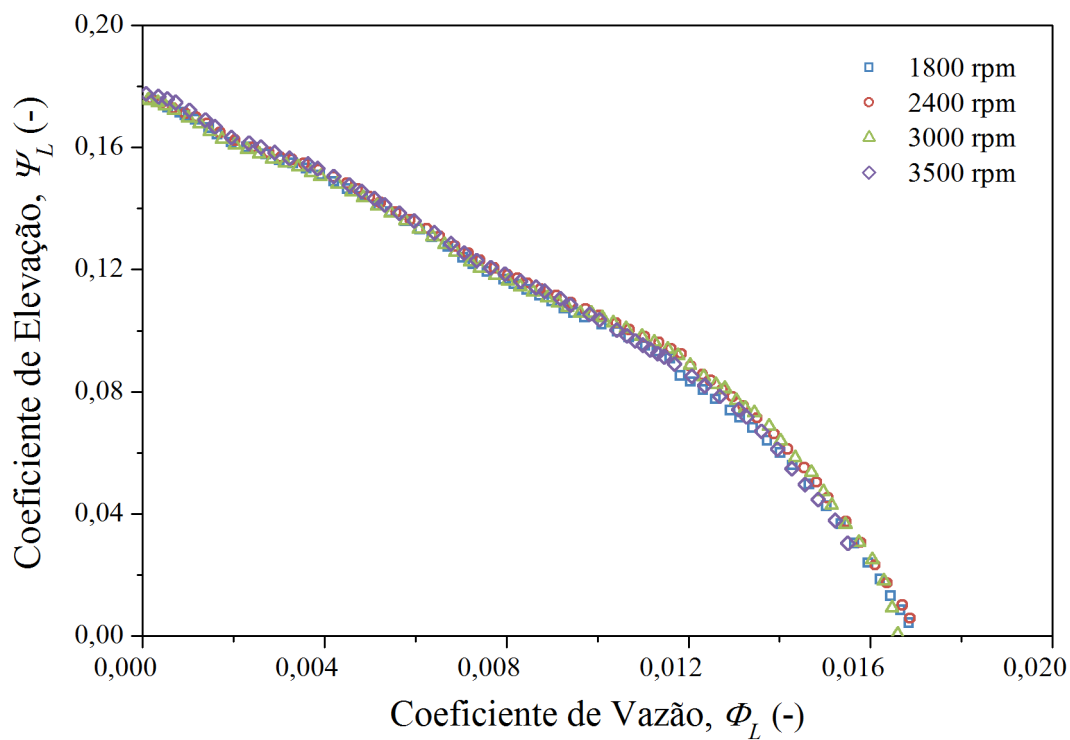


Figura 4.22 – Elevação adimensional da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm.

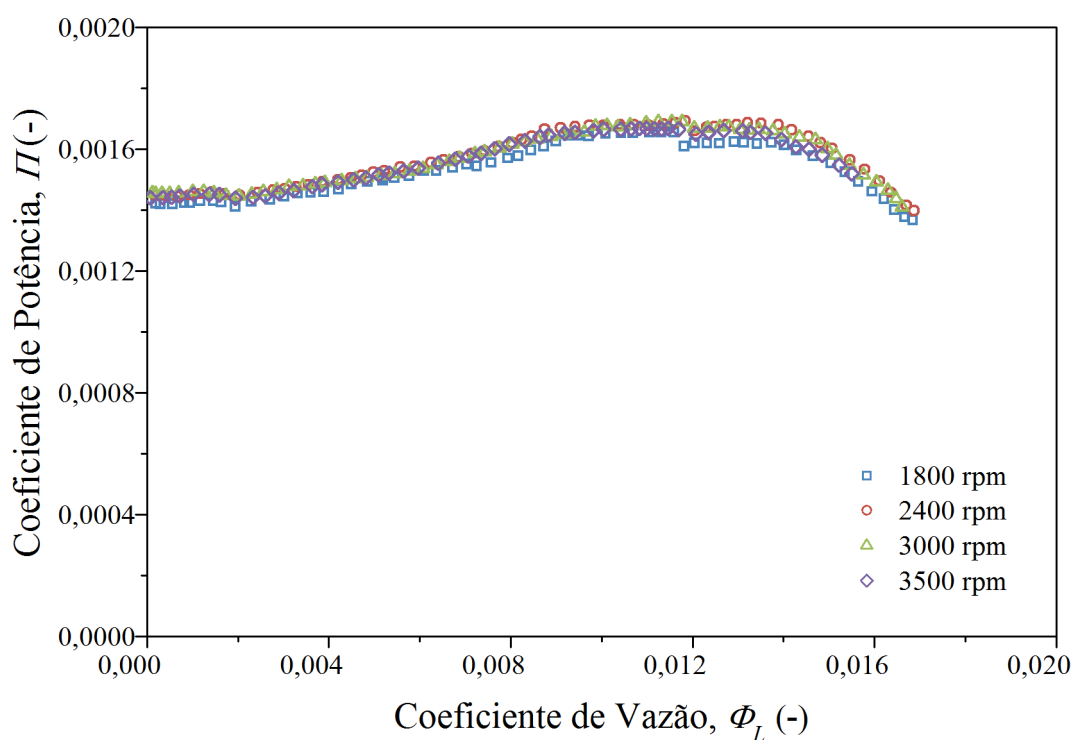


Figura 4.23 – Potência adimensional da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm.

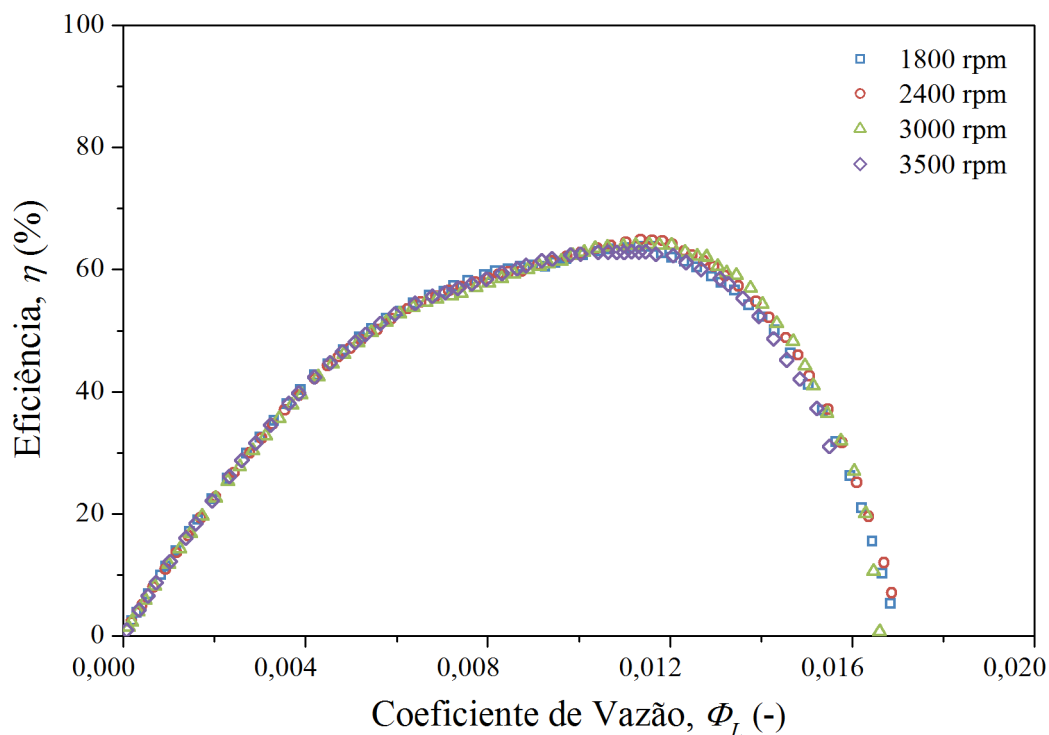


Figura 4.24 – Eficiência adimensional da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm.

As curvas de ganho de pressão por estágio da BCS GN5200, para as rotações de 1800, 2400, 3000 e 3500 rpm são apresentadas na Figura 4.25, Figura 4.26, Figura 4.27 e Figura 4.28, respectivamente. Em todas as rotações é observado que o primeiro estágio possui um desempenho inferior os demais, principalmente em vazões menores que o BEP. O desempenho inferior do primeiro estágio pode ser relacionado aos efeitos de entrada, devido a rotação induzida ao fluido pelo eixo de acionamento. Os desempenhos do 2º e 3º estágios são similares.

Na Figura 4.29, Figura 4.30 e Figura 4.31, são apresentadas as curvas de elevação adimensionais para o 1º, 2º e 3º estágios, respectivamente. Os resultados para o 2º e 3º estágios apresentam concordância com as leis de similaridade. No entanto, o desempenho do 1º estágio, verifica-se uma maior dispersão dos dados.

Na Figura 4.32, são apresentadas as elevações adimensionais fornecidas pelo impelidor e estator do 2º estágio, nas rotações de 1800, 2400, 3000 e 3500 rpm. Esses resultados revelam que tanto o impelidor quando o estator seguem as leis de similaridade.

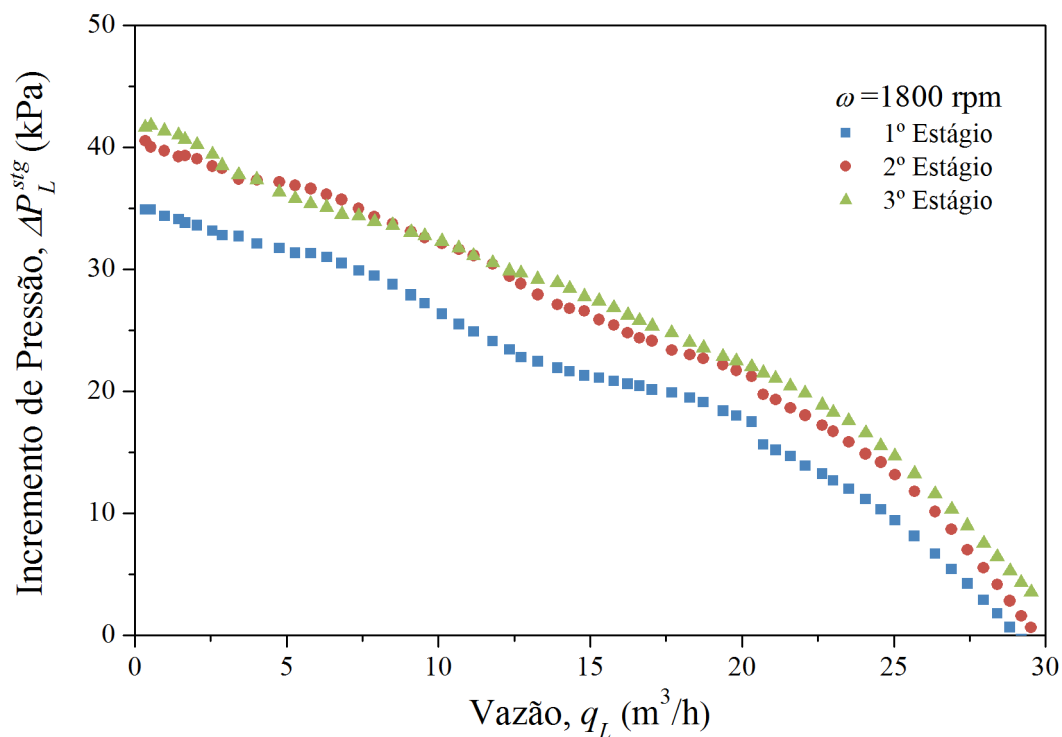


Figura 4.25 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 1800 rpm.

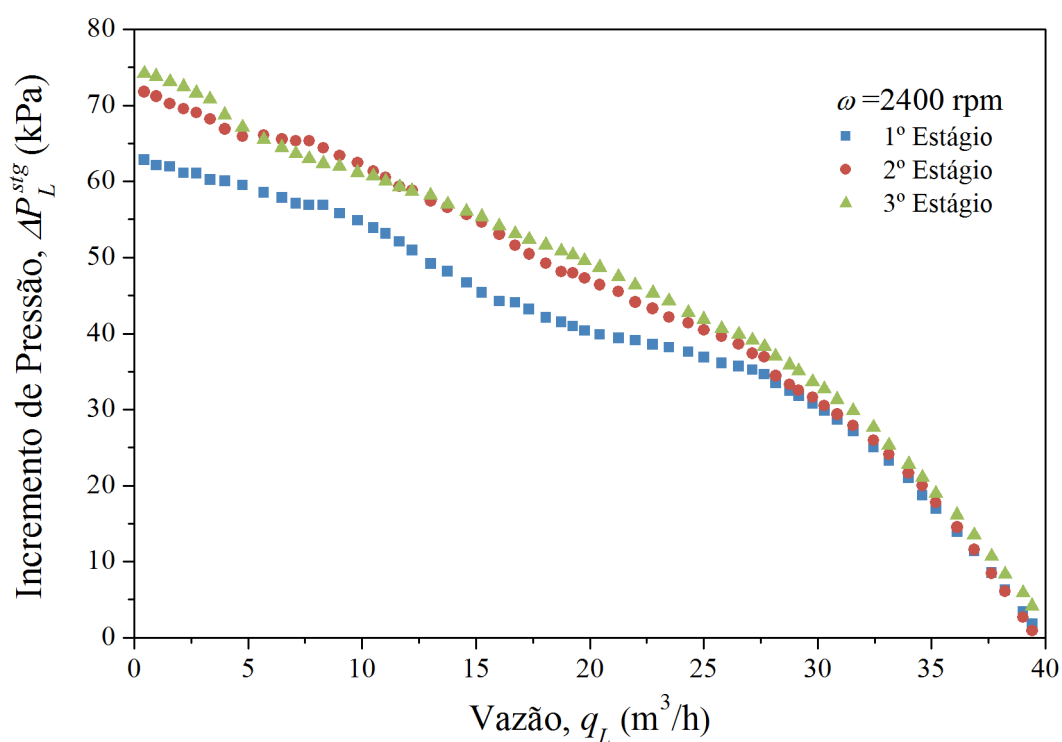


Figura 4.26 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 2400 rpm.

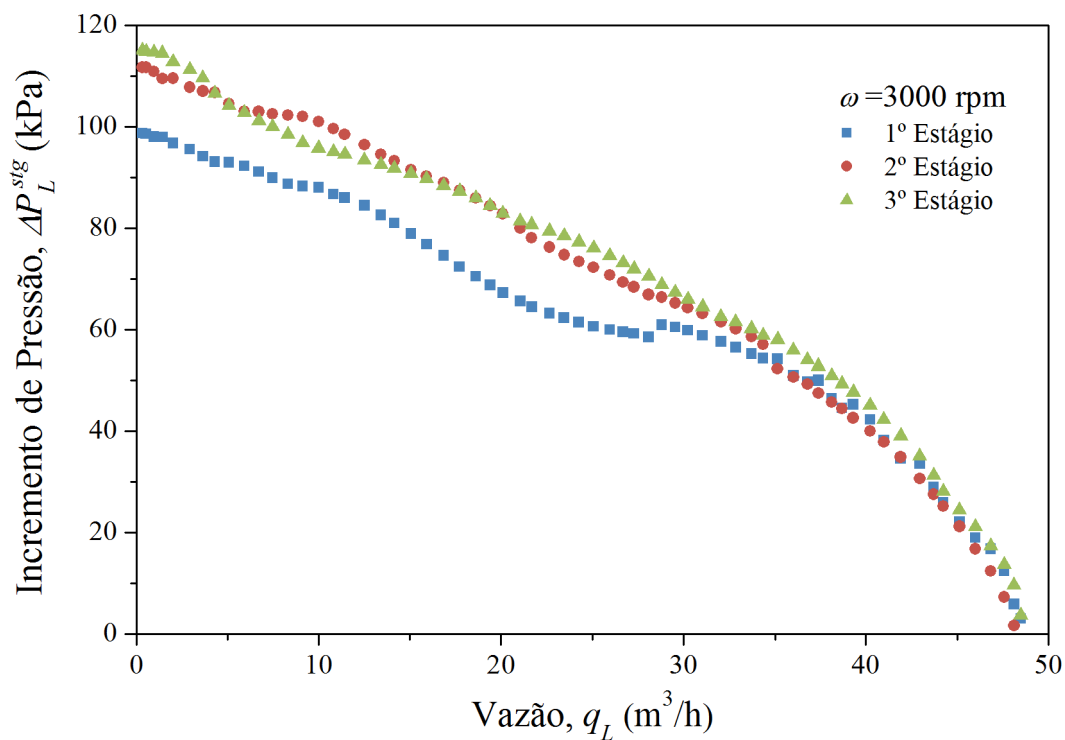


Figura 4.27 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 3000 rpm.

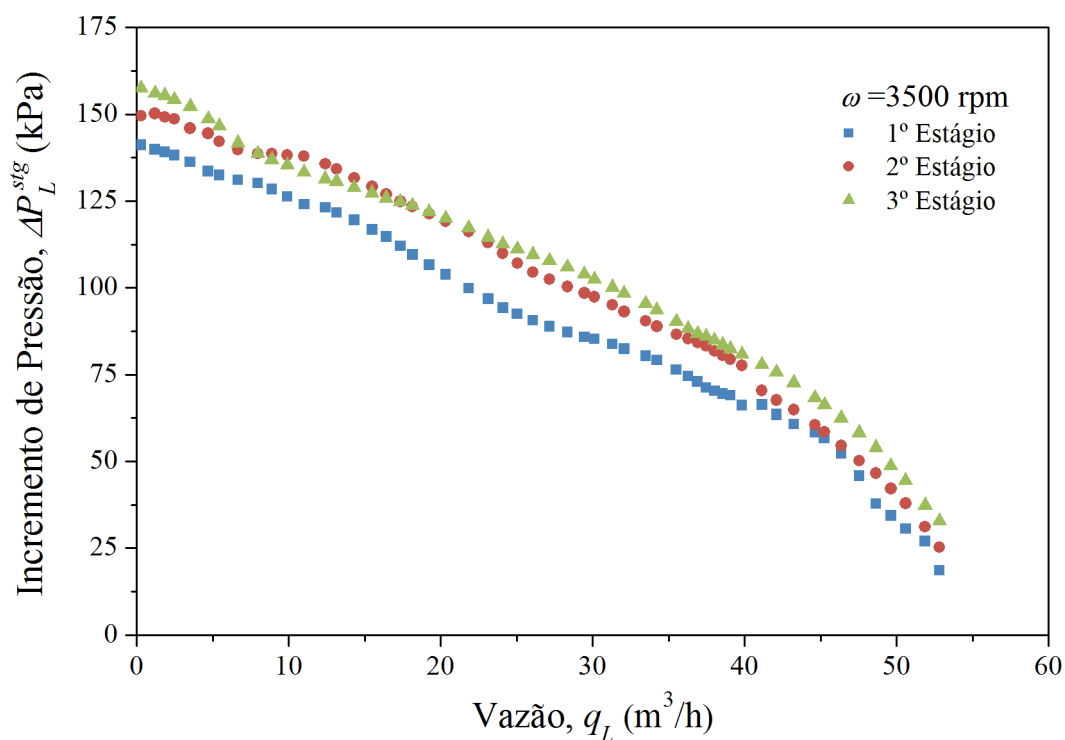


Figura 4.28 – Desempenho por estágio da BCS GN5200, operando com água na rotação de 3500 rpm.

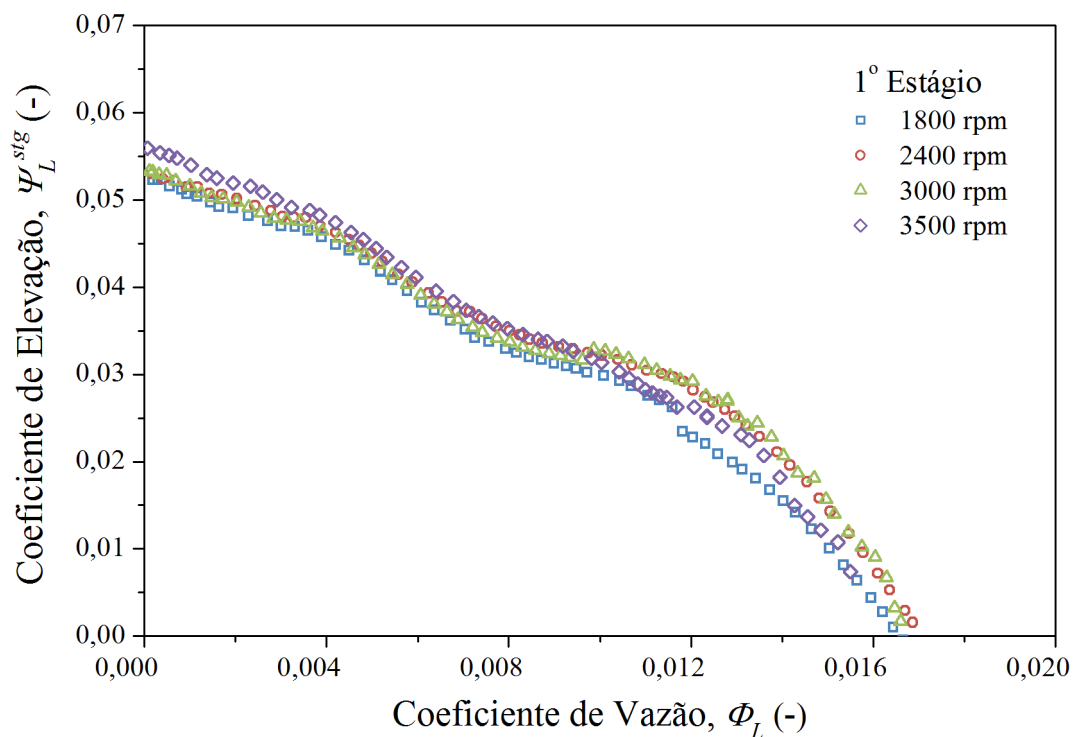


Figura 4.29 – Elevação adimensional do 1º estágio da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm.

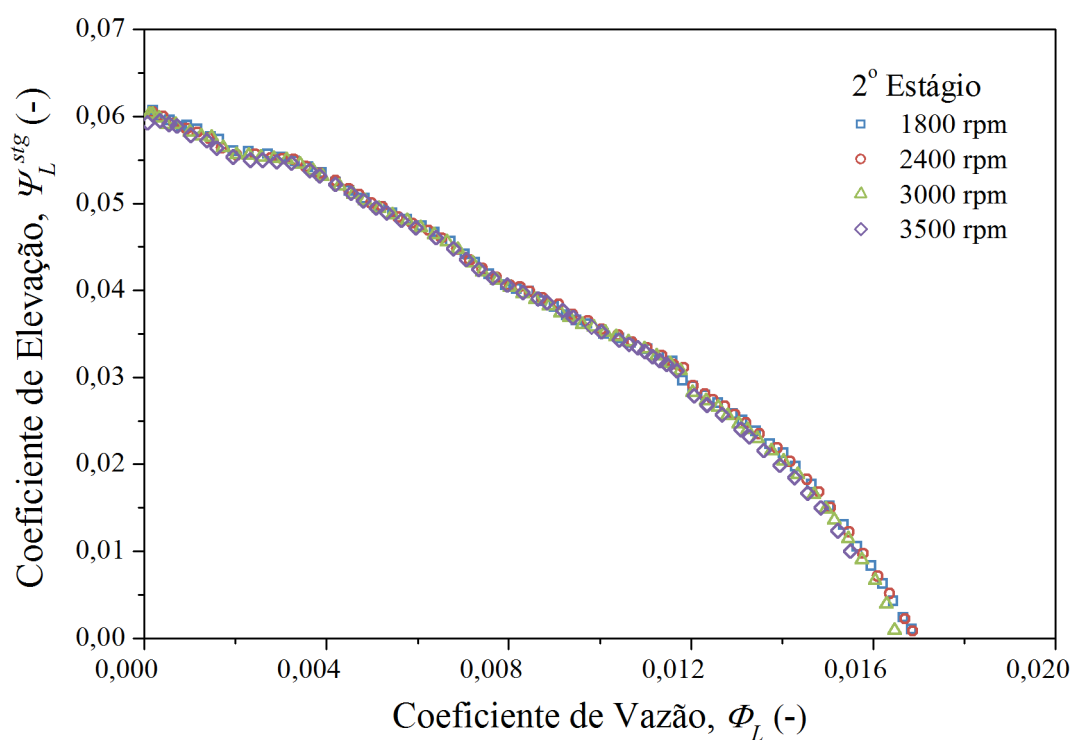


Figura 4.30 – Elevação adimensional do 2º estágio da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm.

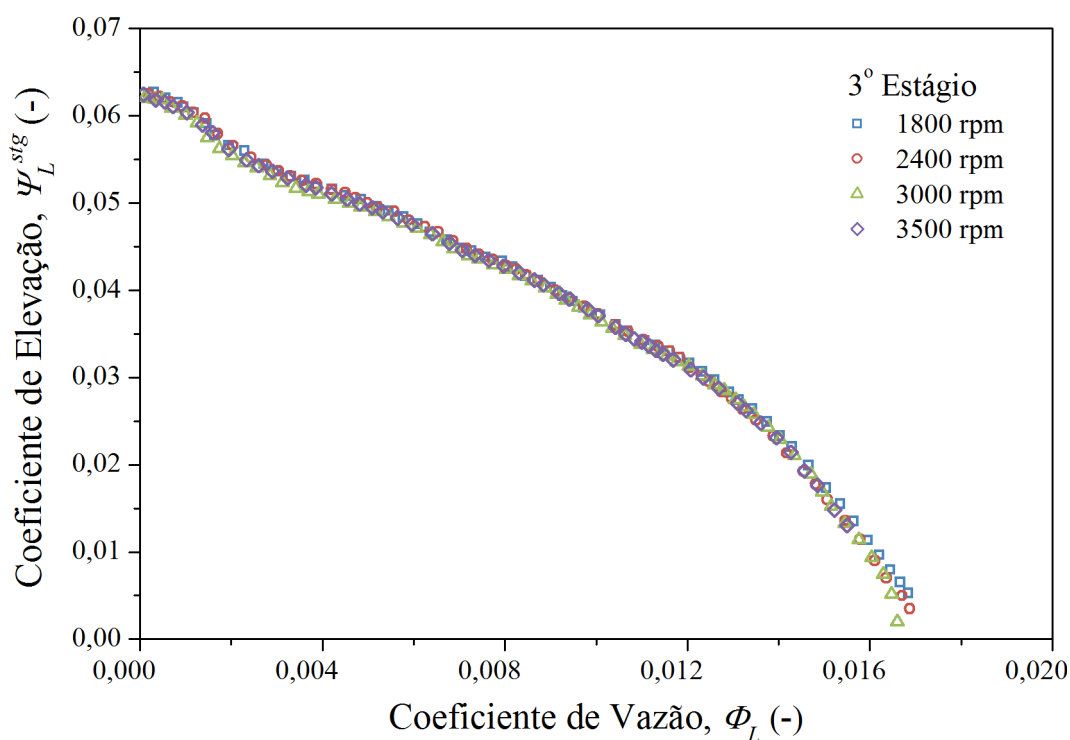


Figura 4.31 – Elevação adimensional do 3º estágio da BCS GN5200 operando com água, nas rotações de 1800, 2400 3000 e 3500 rpm.

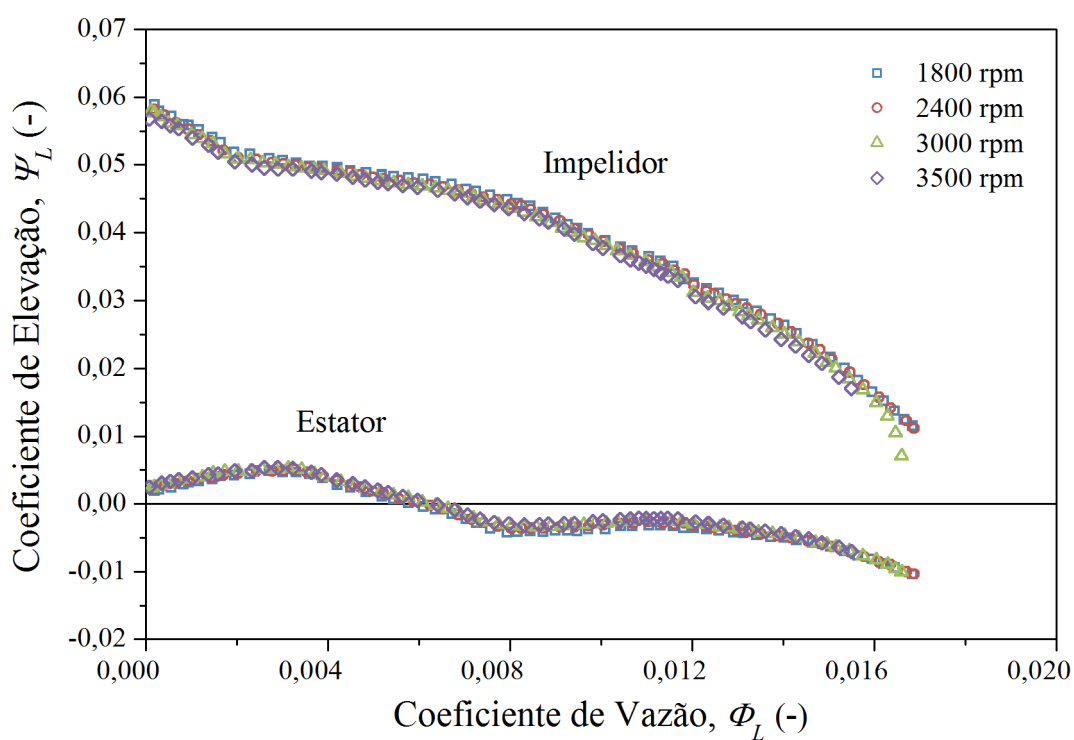


Figura 4.32 – Elevação adimensional do impelidor e estator do 2º estágio.

Para coeficientes de vazão abaixo de 0,005, o estator apresenta um ganho de pressão positivo, enquanto para o restante da curva, verifica-se um ganho de pressão negativo. A análise do ganho de pressão, por si só, não é suficiente para avaliar o escoamento através do estator. Por se tratar de um componente estático, ele obrigatoriamente representa uma dissipação energética. Portanto, a região de ganho de pressão positiva deve-se a redução da energia cinética.

Os testes de desempenho monofásico da BCS GN5200 operando com água, também, foram realizados na inclinação  $\theta = 90^\circ$ . Devido à força gravitacional influenciar no balanço das cargas no mancal, esses testes são importantes para avaliar possíveis alterações na potência consumida pela BCS.

No cálculo do desempenho da BCS operando verticalmente, é necessário levar em consideração os termos gravitacionais no balanço de energia através da bomba. Esses termos são relevantes, principalmente, em baixas rotações, em que o ganho de pressão é comparável à diferença de cotas entre as tomadas de pressão.

Os resultados de desempenho obtidos nos testes monofásicos verticais apresentam completa concordância com os resultados dos testes horizontais. As análises feitas nessa seção, também, são válidas para os testes verticais. Portanto, os resultados dos testes verticais com água são apresentados apenas no ANEXO I.

#### **4.2.1 Testes Monofásicos com Fluido Viscoso**

As curvas de elevação, potência e eficiência da BCS GN5200 operando com fluido viscoso, na rotação de 1200 rpm, são apresentadas na Figura 4.33, Figura 4.34, Figura 4.35, respectivamente. A linha tracejada indica os pontos de melhor eficiência para diferentes viscosidades. A curva de desempenho com água, também, é apresentada como referência.

Com o incremento da viscosidade, as dissipações viscosas aumentam, causando a deterioração do desempenho da bomba. A vazão e a elevação do BEP diminuem, deslocando a eficiência máxima para a esquerda da curva. A potência consumida sofre um aumento acentuado, enquanto a bomba perde capacidade de transferir energia ao fluido, resultando em uma redução considerável da sua eficiência.



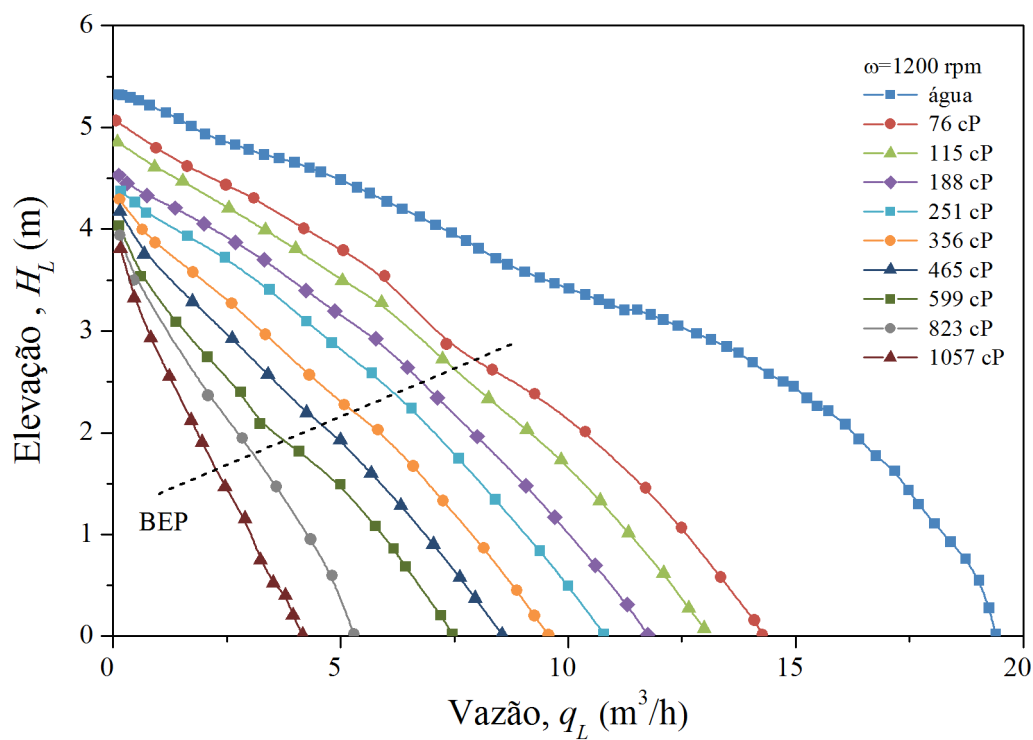


Figura 4.33 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1200 rpm.

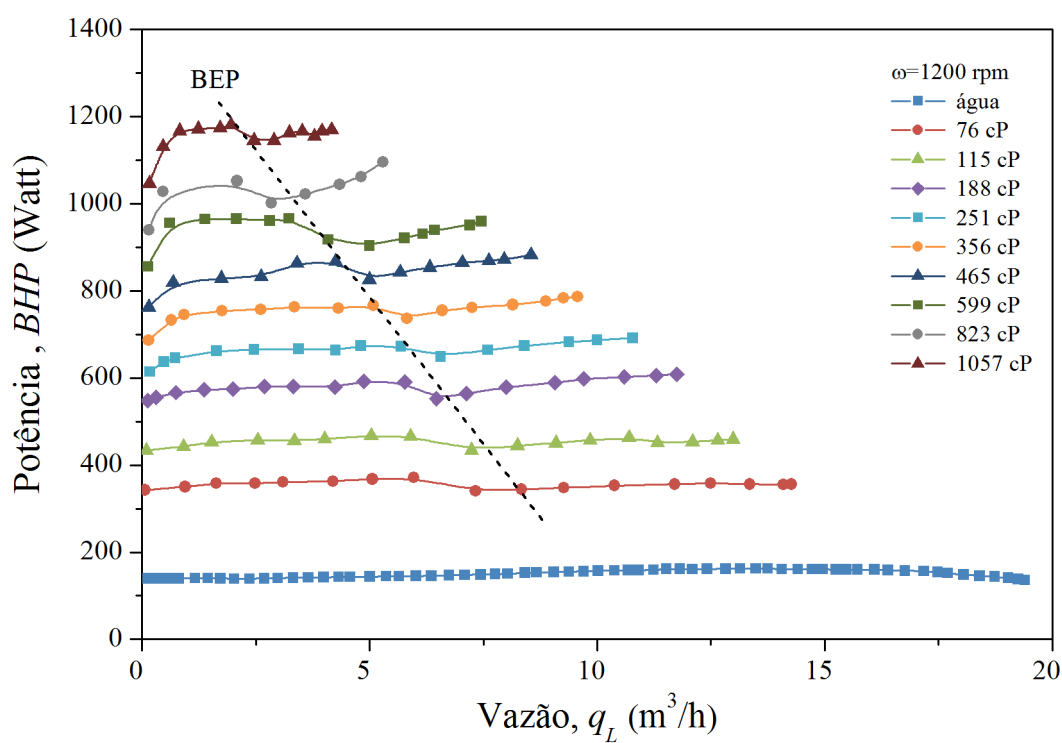


Figura 4.34 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1200 rpm.

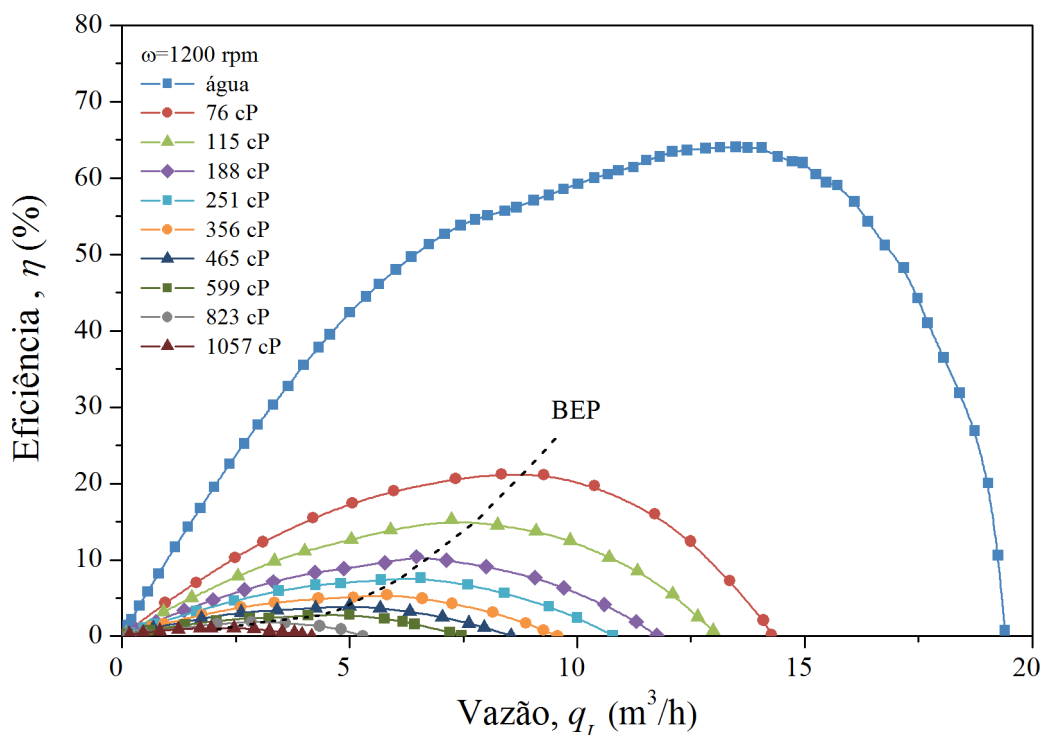


Figura 4.35 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1200 rpm.

Diferentemente do relatado na literatura, a elevação referente a vazão zero diminui com aumento da viscosidade. As teorias relacionadas à operação de bombas centrífugas com fluidos viscosos consideram que a elevação do ponto de *shut-off* é constante e independente da viscosidade do fluido. A medição do desempenho da bomba operando com fluido viscoso na condição de *shut-off* é dificultada pelo rápido aquecimento do fluido. A aquisição dos dados nessa condição operacional deve ser feita rapidamente, pois a energia dissipada pela bomba aquece o fluido, reduzindo sua viscosidade. Isso contribui para o aumento da incerteza da medição.

As curvas de elevação, potência e eficiência da BCS GN5200 operando com fluido viscoso, na rotação de 1800 rpm, são apresentadas na Figura 4.36, Figura 4.37 e Figura 4.38.

As curvas de elevação, potência e eficiência da BCS GN5200 operando com fluido viscoso, na rotação de 2400 rpm, são apresentadas na Figura 4.39, Figura 4.40 e Figura 4.41.

As curvas de elevação, potência e eficiência da BCS GN5200 operando com fluido viscoso, na rotação de 3000 rpm, são apresentadas na Figura 4.42, Figura 4.43 e Figura 4.44.

As curvas de elevação, potência e eficiência da BCS GN5200 operando com fluido viscoso, na rotação de 3500 rpm, são apresentadas na Figura 4.45, Figura 4.46 e Figura 4.47.

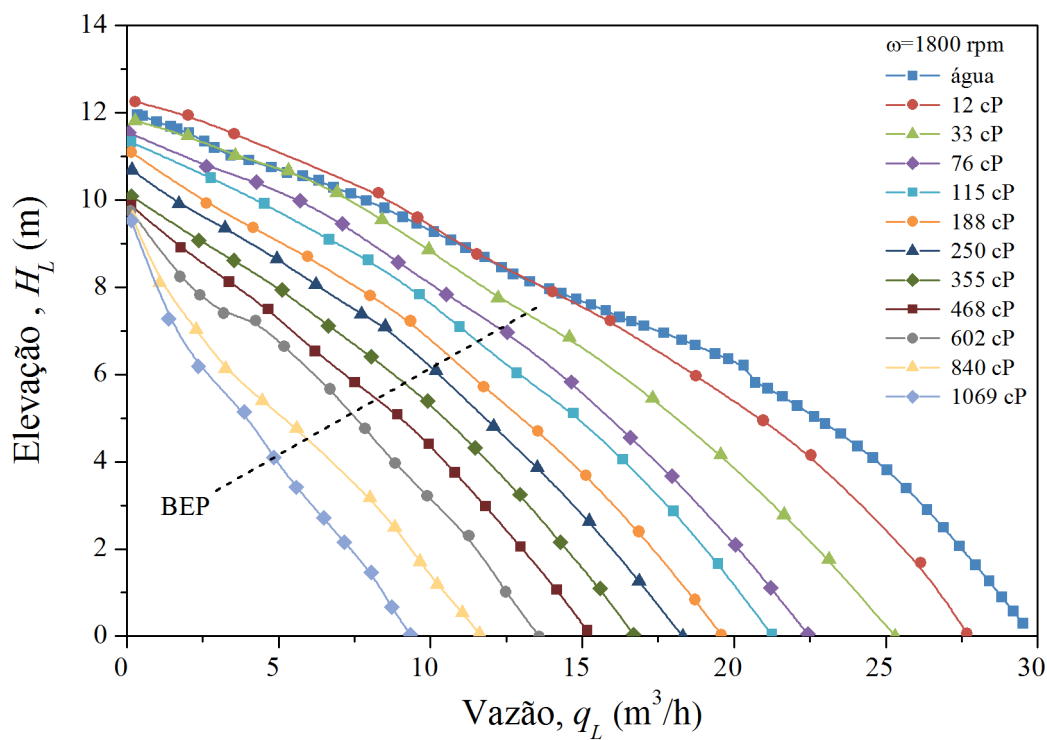


Figura 4.36 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1800 rpm.

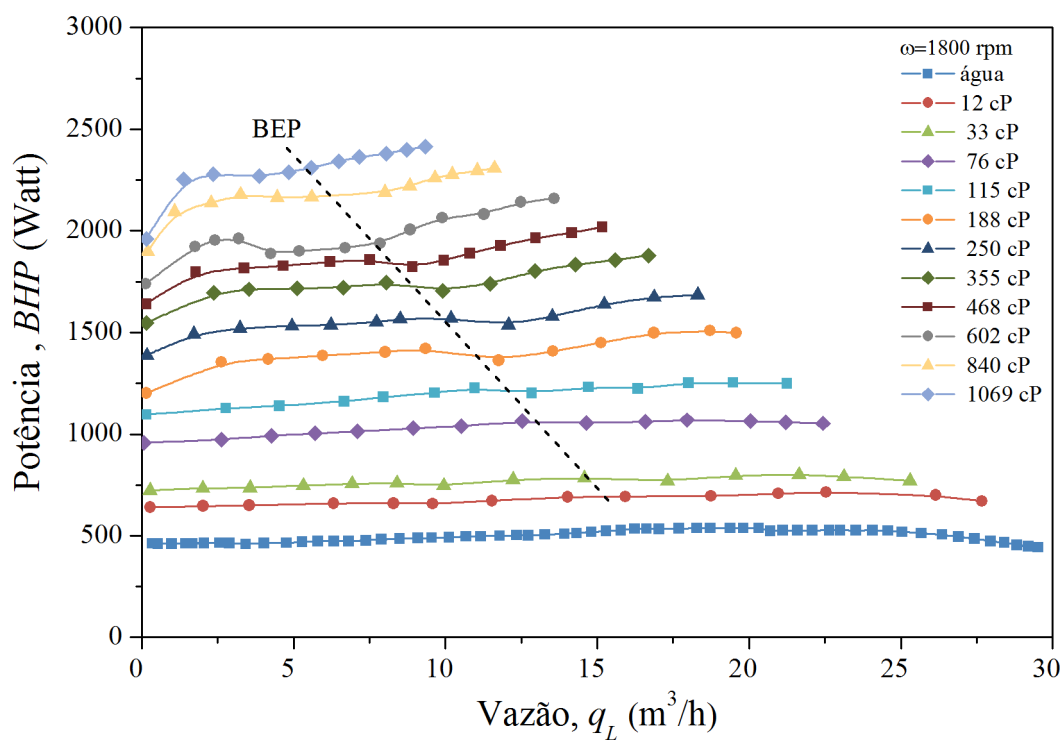


Figura 4.37 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1800 rpm.

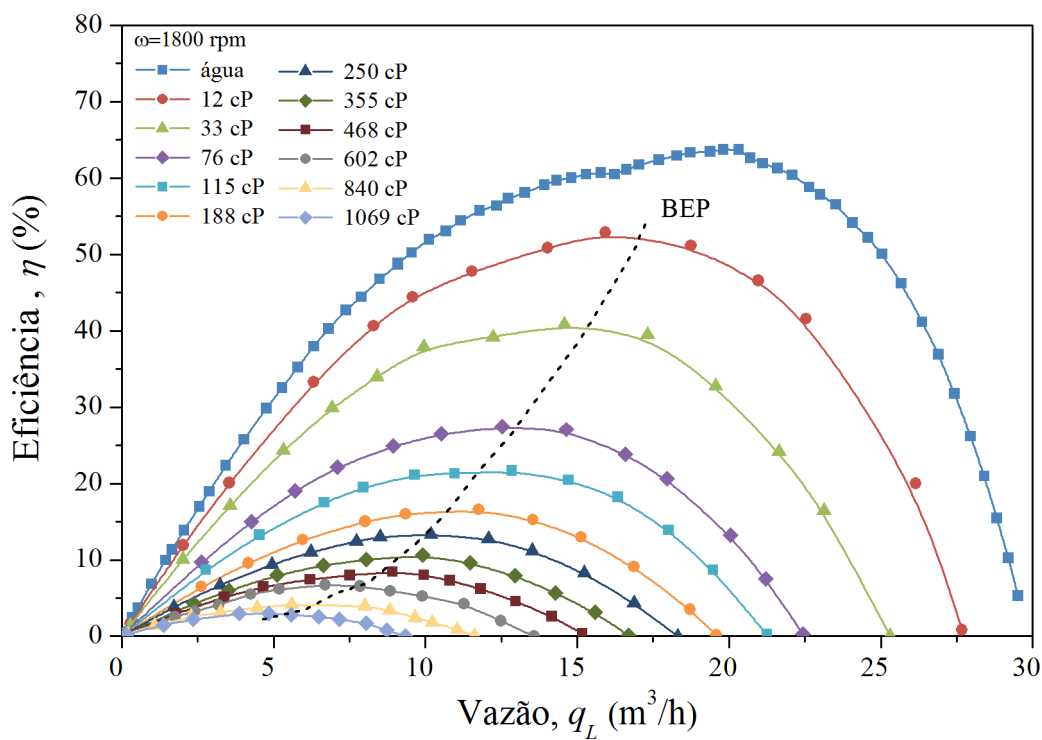


Figura 4.38 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 1800 rpm.

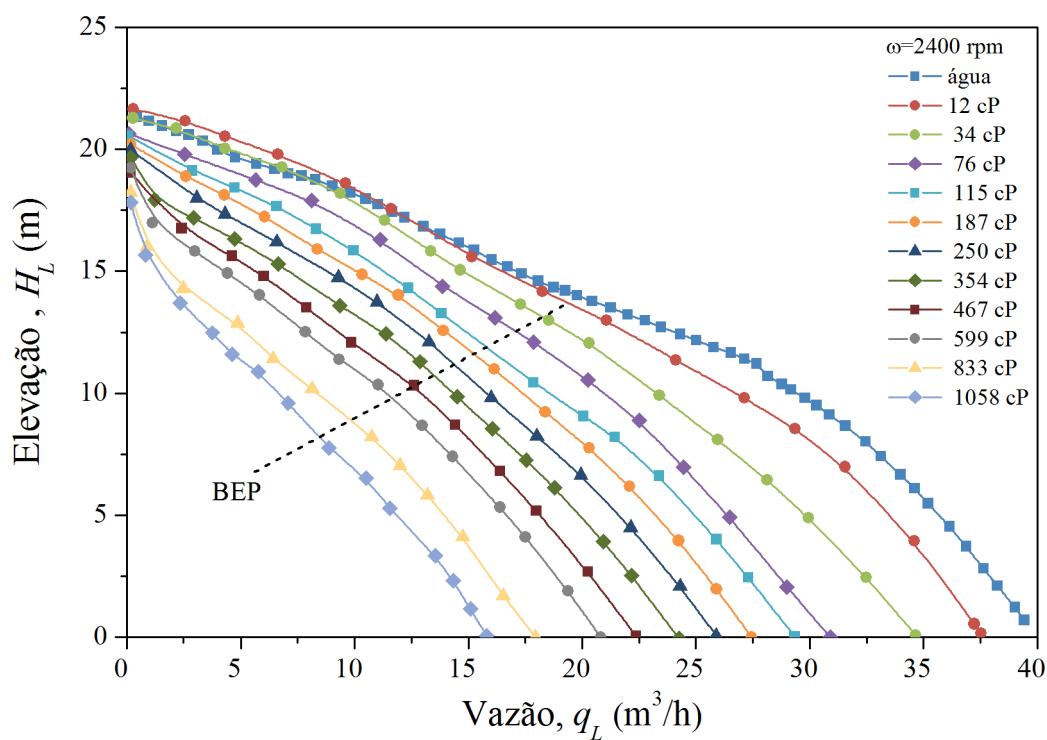


Figura 4.39 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 2400 rpm.

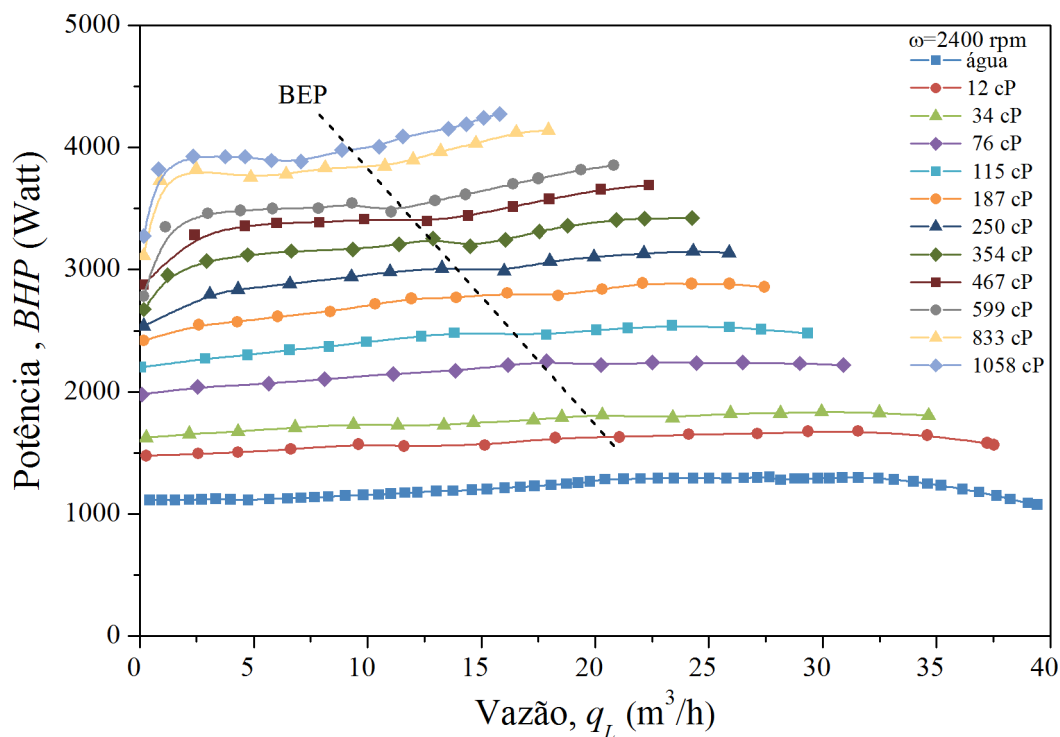


Figura 4.40 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 2400 rpm.

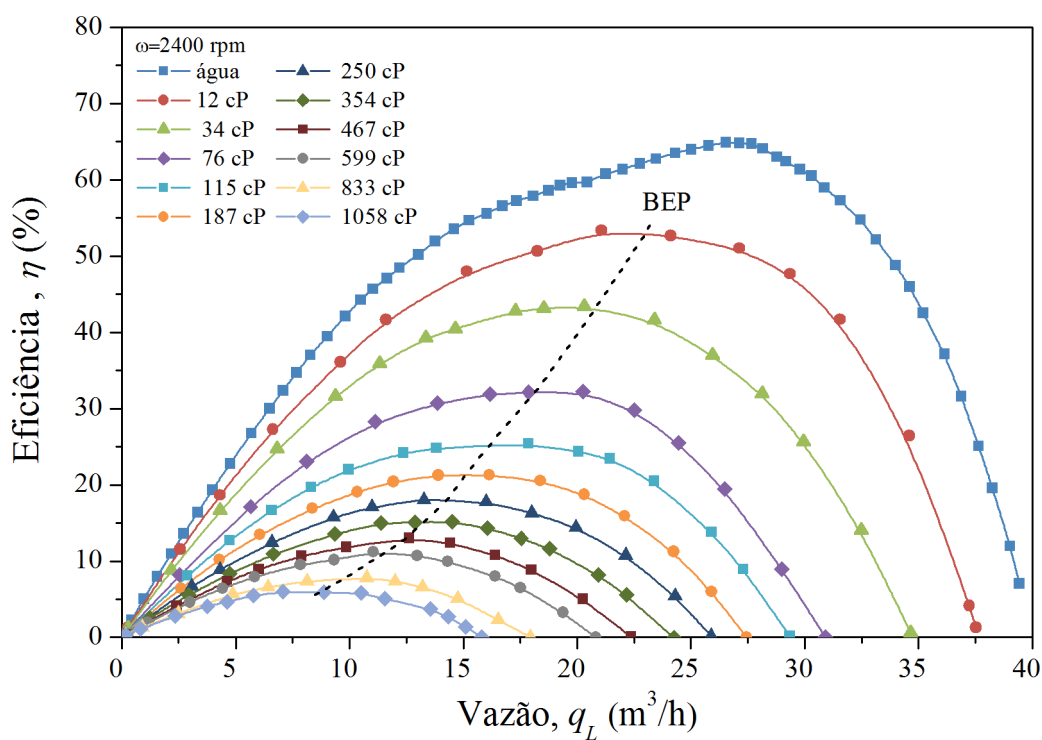


Figura 4.41 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 2400 rpm.

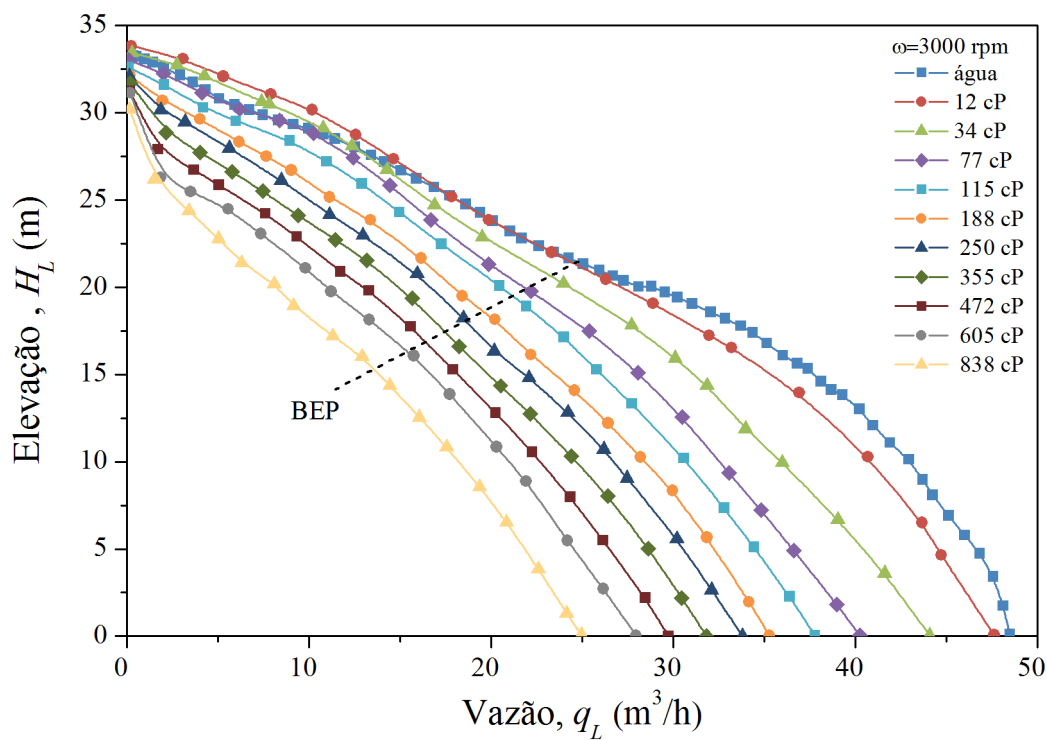


Figura 4.42 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3000 rpm.

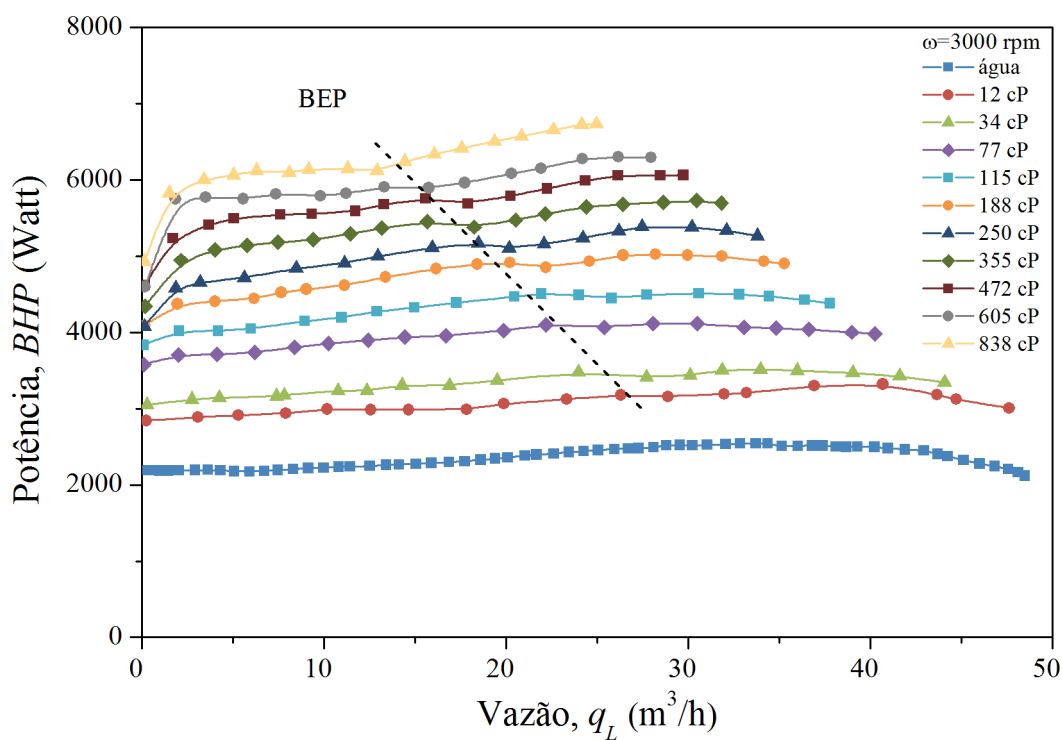


Figura 4.43 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3000 rpm.

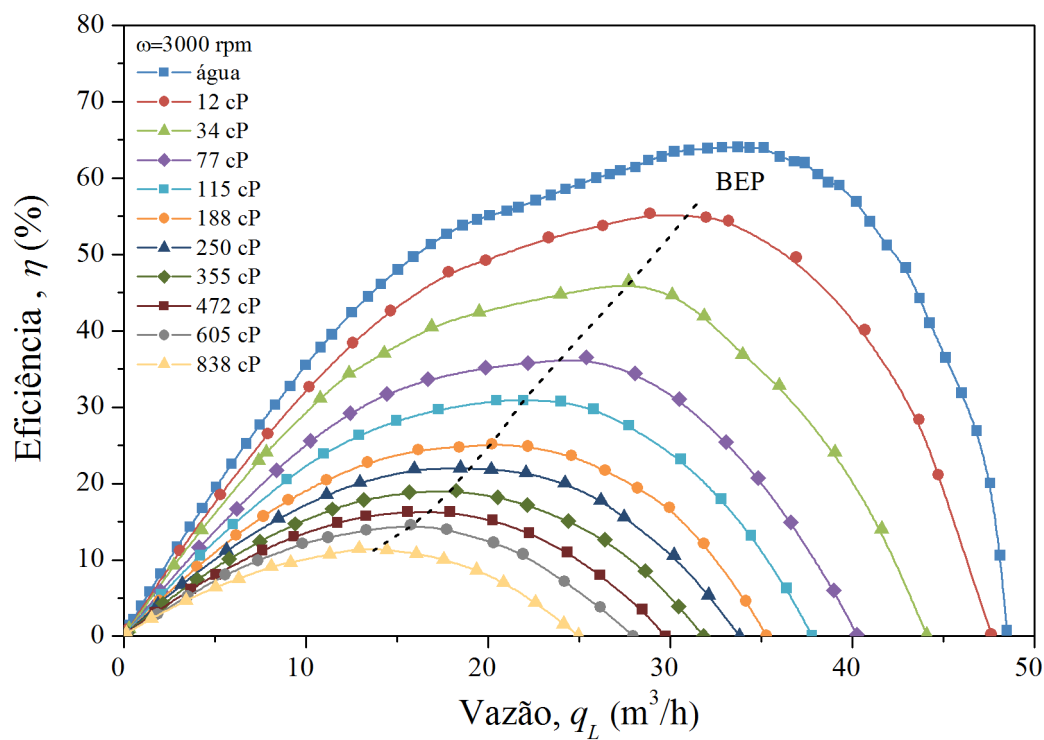


Figura 4.44 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3000 rpm.

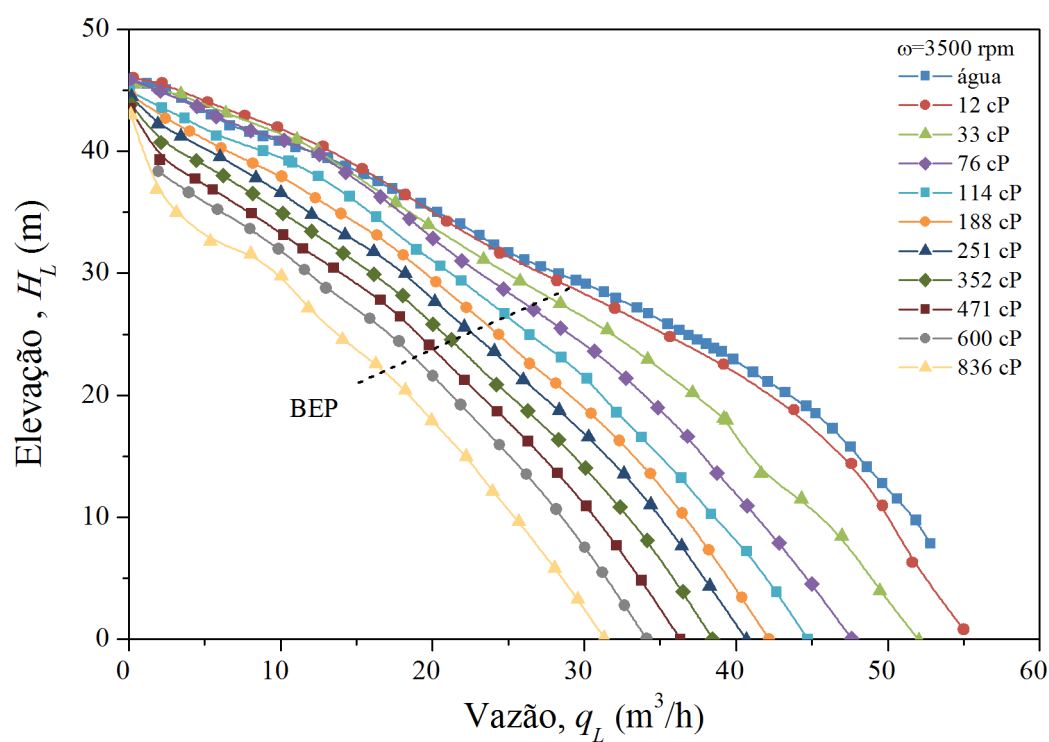


Figura 4.45 – Curva de elevação da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3500 rpm.

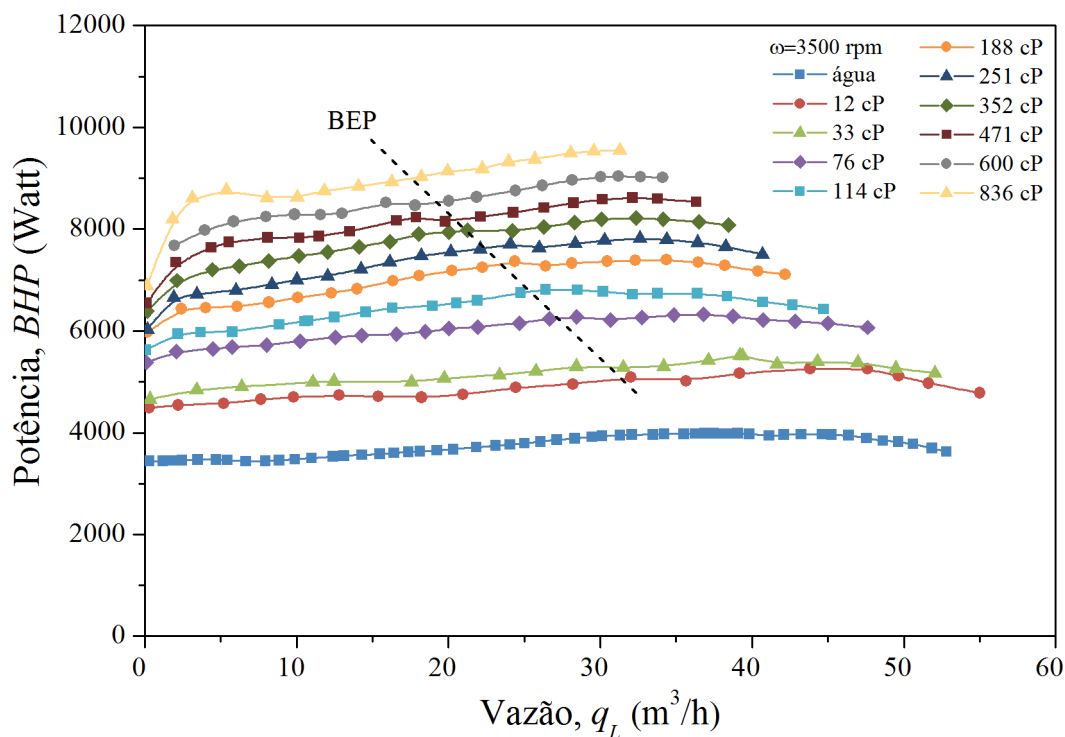


Figura 4.46 – Curva de potência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3500 rpm.

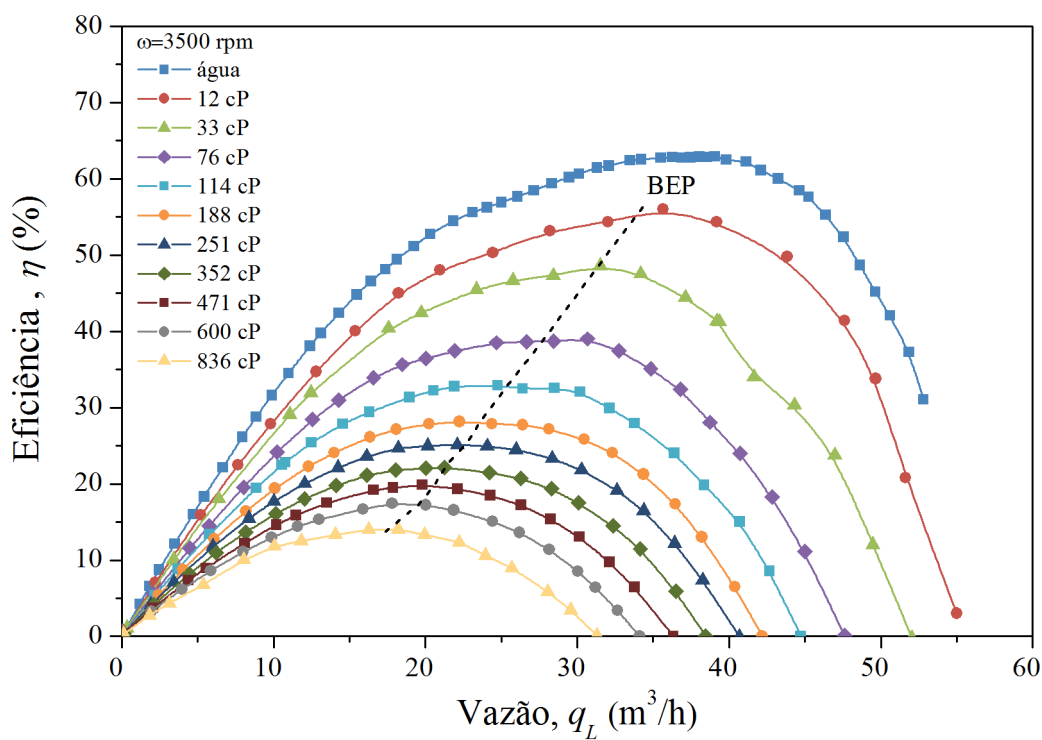


Figura 4.47 – Curva de eficiência da BCS GN5200 operando em diferentes viscosidades a 3500 rpm.



Para as viscosidades em torno de 12 cP, em alguns pontos experimentais, a elevação fornecida pela BCS é maior que àquela observado na operação com água. Isso é possível devido à diminuição das perdas por vazamento no interior da bomba. A viscosidade do fluido atua vedando as folgas internas e, conseqüentemente, aumenta a eficiência volumétrica da bomba.

Com base nos resultados apresentados acima, verifica-se que o aumento da rotação diminui o efeito de degradação provocado pela viscosidade. Para a rotação de 1200 rpm e viscosidade 823 cP, a eficiência máxima é de, apenas, 2%. Na rotação de 3500 rpm e viscosidade de 836 cP, a eficiência máxima é de 14%. O mesmo efeito ocorre para viscosidade menores. Para a viscosidade de 76 cP a eficiência no BEP é de 22% e 40%, nas rotações de 1200 e 3500 rpm, respectivamente.

A Figura 4.48 e Figura 4.49 apresentam o incremento de pressão medido por estágio na BCS GN5200 operando a 1200 e 3500 rpm, respectivamente. Analisando-se esses resultados, verifica-se que o aumento da viscosidade faz com que a degradação do primeiro estágio diminuía em relação aos demais.

Na Figura 4.50 e Figura 4.51 são apresentados os incrementos de pressão no estator e impelidor do segundo estágio para as rotações de 1200 e 3500 rpm, respectivamente.

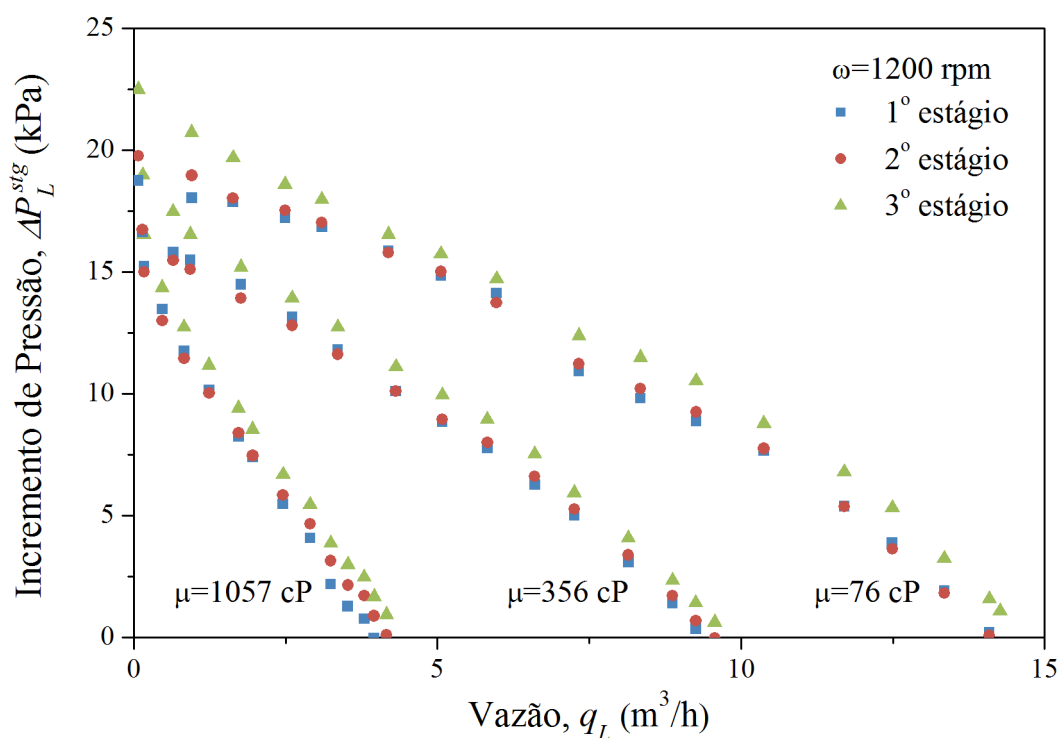


Figura 4.48 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200 na rotação de 1200 rpm e viscosidades de 76, 356 e 1057 cP.

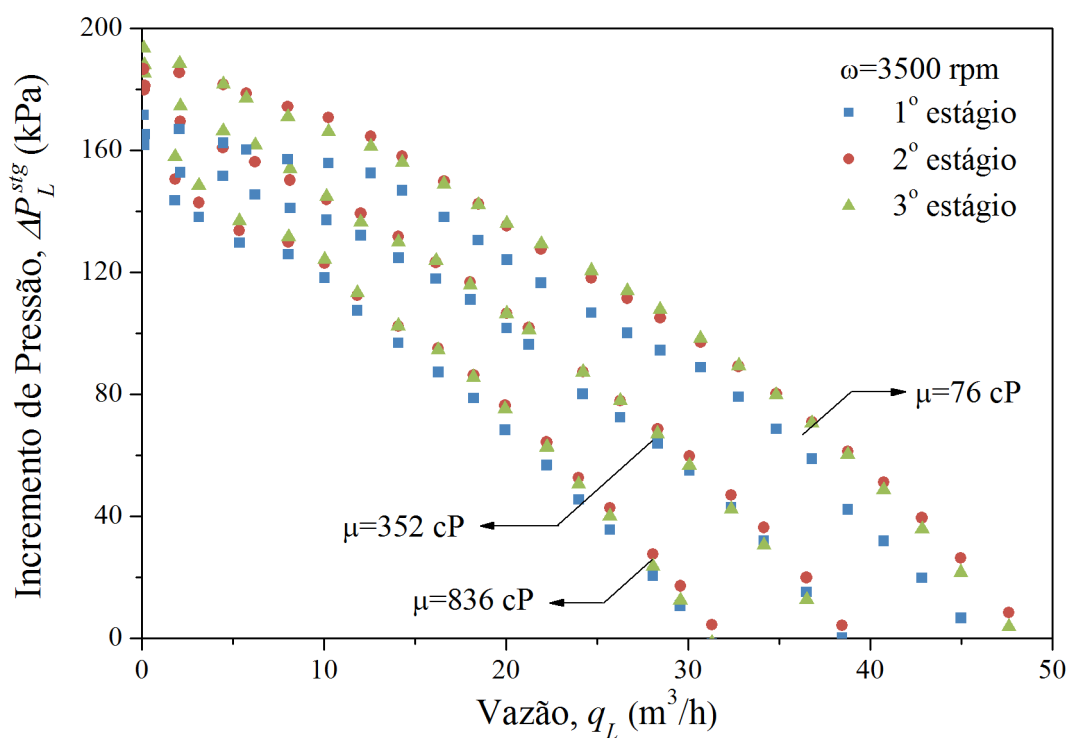


Figura 4.49 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200 na rotação de 3500 rpm e viscosidades de 76, 352 e 832 cP.

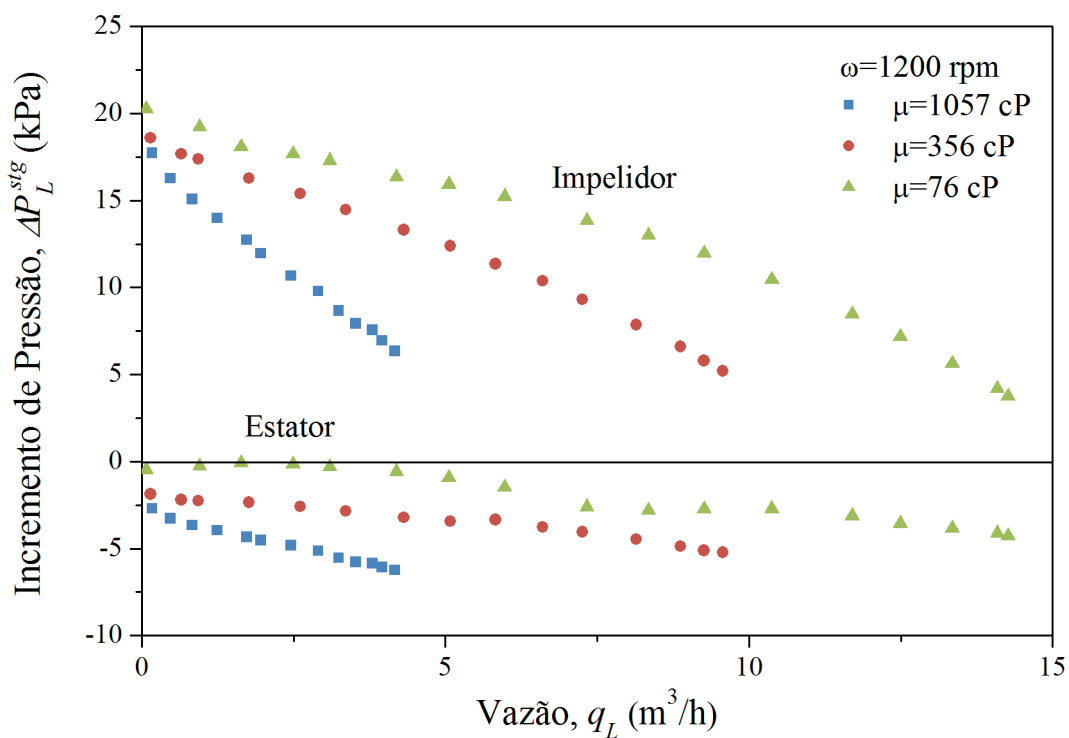


Figura 4.50 – Incremento de pressão do estator e impelidor do segundo estágio BCS GN5200 na rotação de 1200 rpm e viscosidades de 76, 356 e 1057 cP.

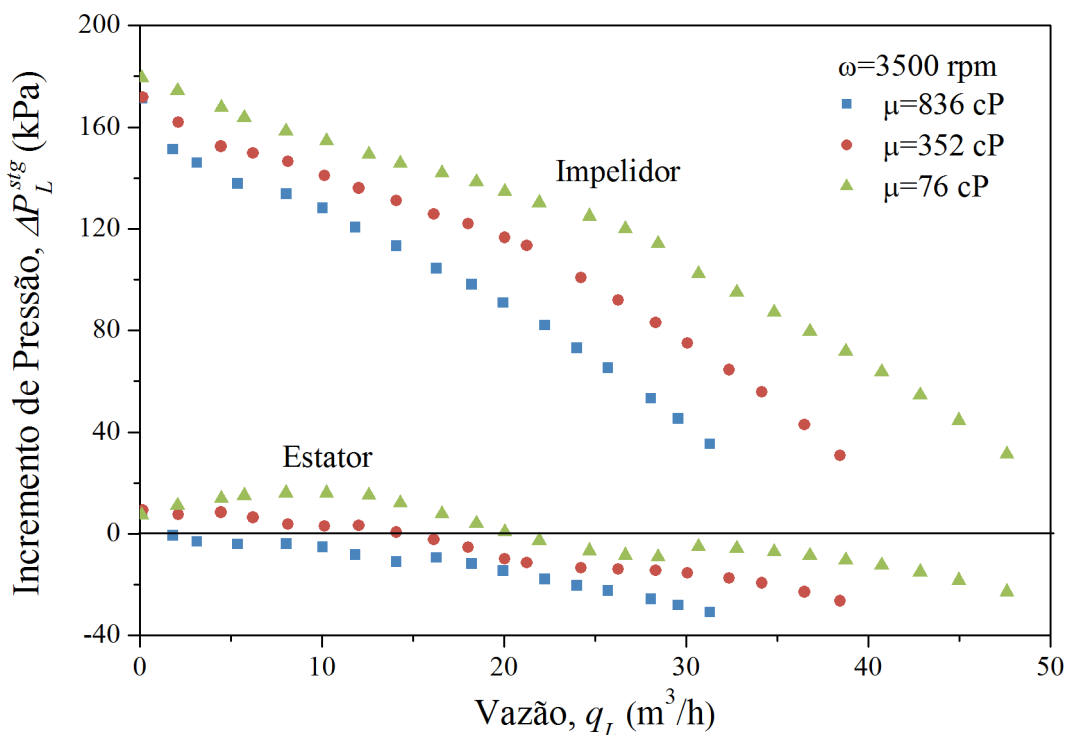


Figura 4.51 – Incremento de pressão do estator e impelidor do segundo estágio BCS GN5200 na rotação de 3500 rpm e viscosidades de 76, 352 e 832 cP.

#### 4.2.1.1 Aquecimento do Fluido Bombeado

Na operação de bombas centrífugas de múltiplos estágios com fluidos viscosos, o aquecimento do meio pode ser considerável, principalmente em baixas vazões. O aquecimento do fluido pode ser estimado considerando-se que toda a ineficiência da bomba seja convertida em calor, que é transferido ao fluido bombeado.

Aplicando-se o balanço de energia através da bomba e considerando-se escoamento adiabático, o ganho de temperatura teórico é dado por:

$$\Delta T_{teórico} = \frac{(BHP - P_h)}{\dot{m}_L c_p} = \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) \frac{\Delta P_L}{\rho_L c_p} \quad (4.1)$$

onde  $BHP$  é a potência consumida pela bomba,  $P_h$  é a potência hidráulica fornecida ao fluido,  $\dot{m}_L$  é a vazão mássica de fluido,  $\eta$  é a eficiência da bomba,  $\Delta P$  é a pressão gerada e  $c_p$  é o calor específico do fluido.

Nos testes realizados nesse trabalho, a BCS GN5200 foi revestida por meio de um isolante térmico, tornando coerente a consideração de escoamento adiabático.

O aquecimento do fluido bombeado, para todas as viscosidades da matriz de testes nas rotações de 2400, 3000 e 3500 rpm é apresentado na Figura 4.52, Figura 4.53 e Figura 4.54, respectivamente. Nessas figuras a linha contínua indica o erro zero entre o valor medido experimentalmente e o calculado pela Equação (4.1), enquanto as linhas tracejadas expressam os limites de  $\pm 20\%$ . Os pontos obtidos experimentalmente são acompanhados das barras de incerteza calculadas para a variável  $\Delta T_{exp} = T_s - T_e$ .

Analisando-se essas figuras, é possível verificar uma boa concordância entre o aquecimento medido experimentalmente e o calculado pela Equação (4.1). Porém, em aplicações em campo, a estimativa do aquecimento do fluido bombeado é dificultada devido ao fato de a bomba ficar imersa no fluido produzido. Portanto, não é possível assumir escoamento adiabático, sendo necessário considerar a troca térmica da bomba com o fluido do poço.

O aquecimento estágio a estágio reduz gradualmente a viscosidade do fluido, melhorando o desempenho dos estágios finais da bomba. Portanto, em bombas com algumas dezenas ou centenas de estágios, a análise do ganho de temperatura torna-se relevante no dimensionamento do equipamento.

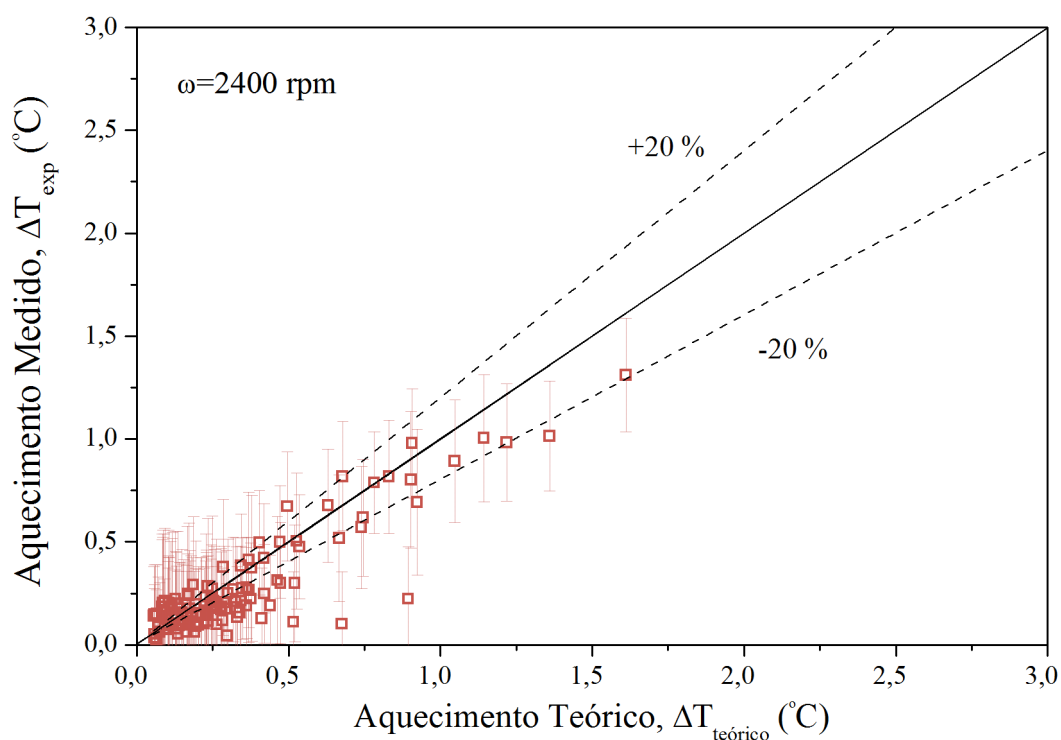


Figura 4.52 – Aquecimento do fluido de trabalho através da BCS GN5200, operando a 2400 rpm.

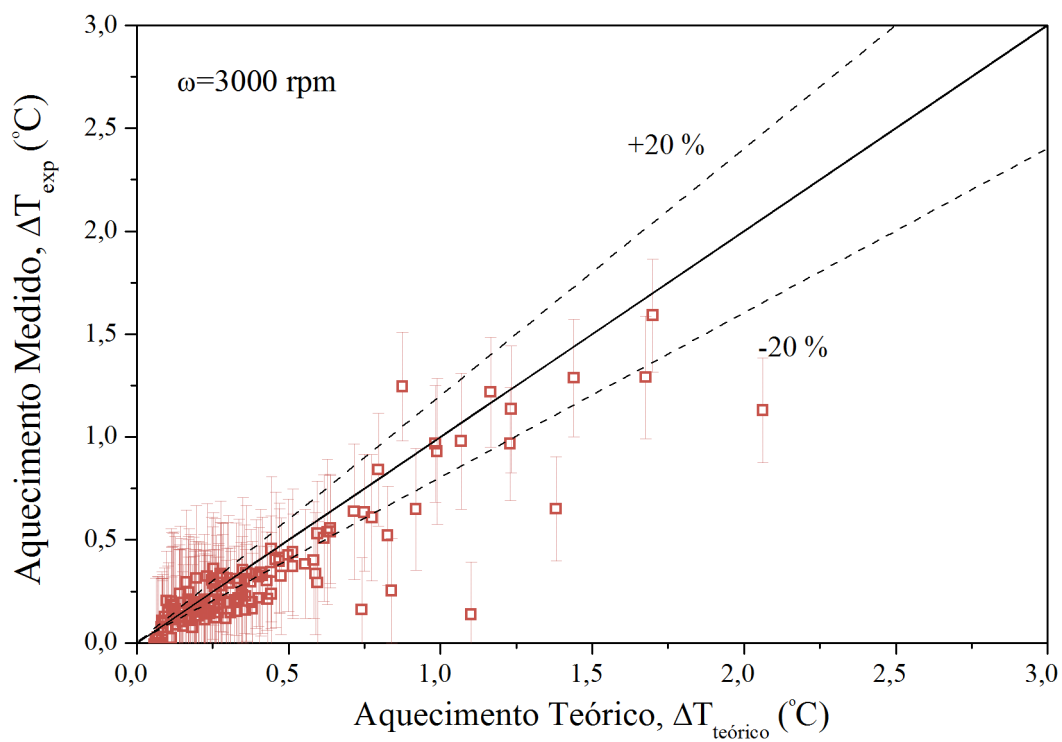


Figura 4.53 – Aquecimento do fluido de trabalho através da BCS GN5200, operando a 3000 rpm.

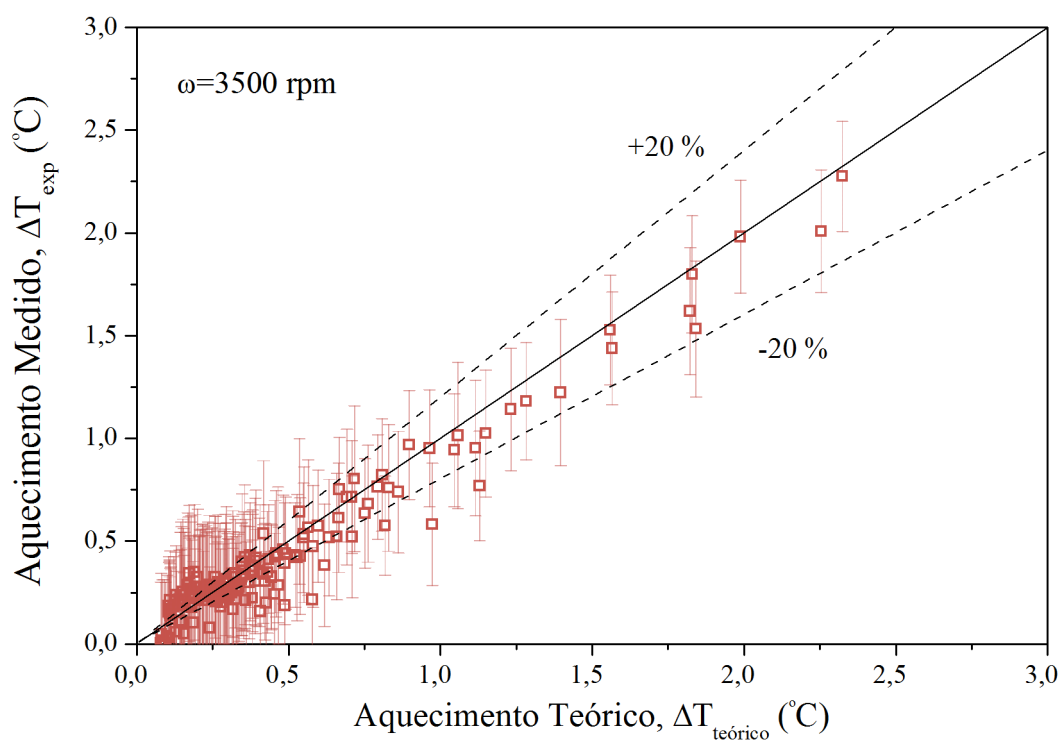


Figura 4.54 – Aquecimento do fluido de trabalho através da BCS GN5200, operando a 3500 rpm.

#### 4.2.1.2 Análise dos Fatores de Correção Viscosos

Os fatores de correção de vazão, elevação e eficiência medidos no BEP, em função da viscosidade e rotação, são apresentados na Figura 4.55, Figura 4.56 e Figura 4.57, respectivamente. Os fatores de correção indicam a magnitude do desvio entre o desempenho da bomba operando com água e o desempenho com fluido viscoso. Portanto, quanto menor o fator de correção, maior é a degradação de desempenho da bomba em relação a operação de referência com água.

Os resultados apresentados nessas figuras revelam que os fatores de correção de vazão, elevação e eficiência aumentam em função da rotação da bomba. Assim, quanto maior a rotação, menor é a degradação do desempenho devido aos efeitos viscosos. A diminuição das perdas viscosas, devido ao aumento da rotação, pode ser explicada pela análise do número de Reynolds. Com o aumento da rotação, a vazão aumenta e, também, o número de Reynolds, diminuindo o fator de atrito.

O fator de correção da eficiência, por ser função dos fatores de correção de vazão e elevação, é o mais afetado pelo incremento da viscosidade. Para a viscosidade de aproximadamente 600 cP e rotação de 3500 rpm, a eficiência diminui 50% em relação a operação com água. Já para rotação de 1200 rpm, a eficiência se reduz a 5% do valor de referência.

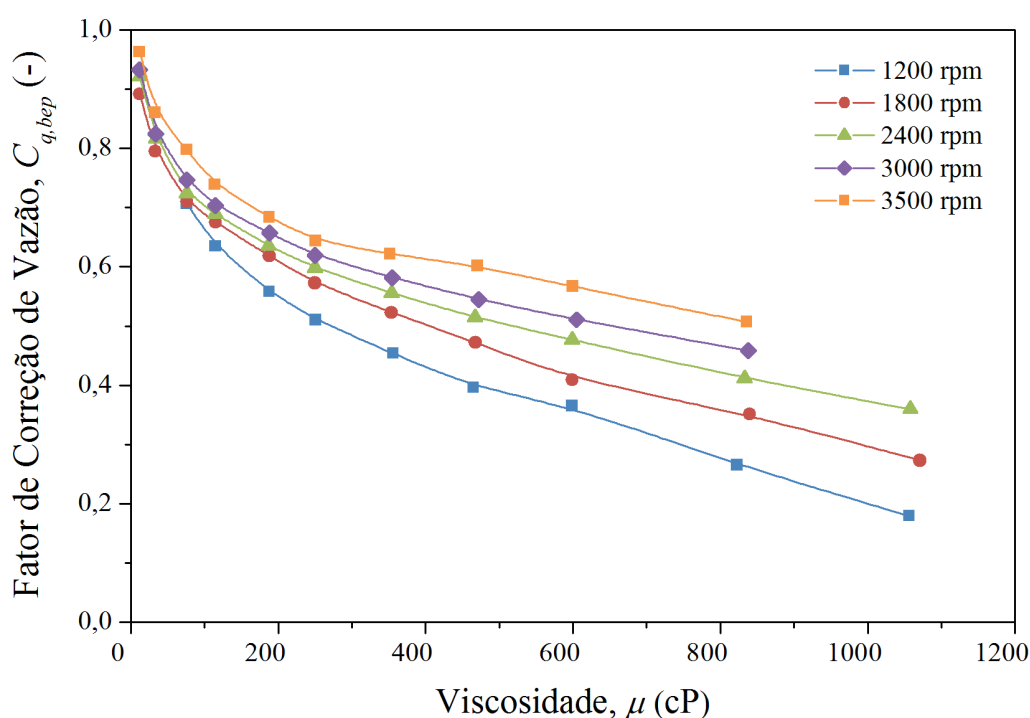


Figura 4.55 – Fator de correção de vazão em função da viscosidade.

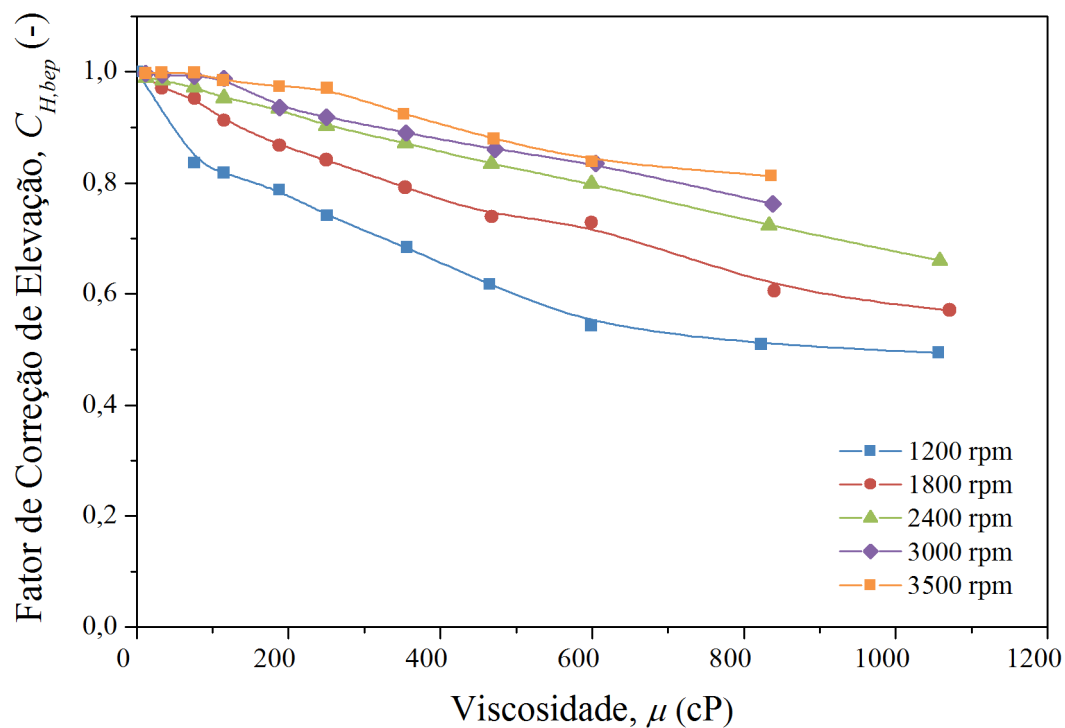


Figura 4.56 – Fator de correção de elevação em função da viscosidade.

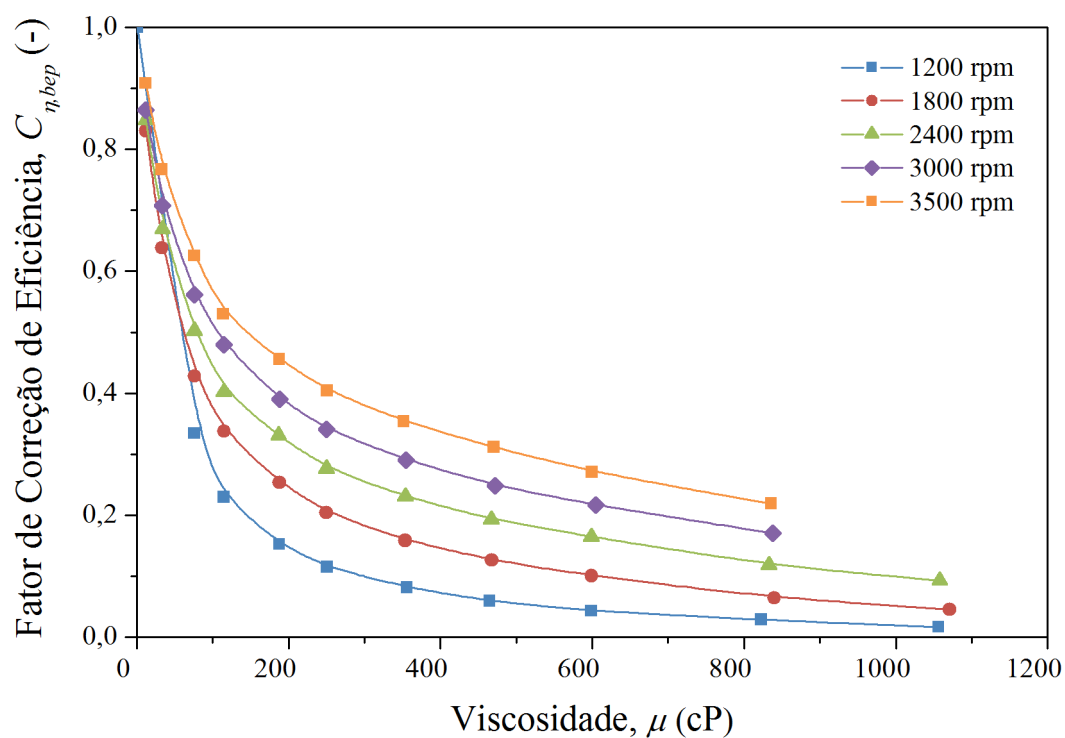


Figura 4.57 – Fator de correção de eficiência em função da viscosidade.

Os fatores de correção obtidos experimentalmente para o BEP foram comparados com os três principais métodos disponíveis na literatura: Stepanoff (1949)/TUALP (2006), Gülich (2008) e a norma ANSI-HI 9.6.7 (2010).

As comparações realizadas para os fatores de correção de elevação, na rotação de 1800 rpm, são apresentadas na Tabela 4.11 e Figura 4.58. O erro apresentado na tabela representa o desvio entre o fator de correção definido pela literatura e o medido experimentalmente, tal que:

$$Erro (\%) = \left( \frac{C_{H,bep_{exp}} - C_{H,bep_{literatura}}}{C_{H,bep_{exp}}} \right) 100 \quad (4.2)$$

onde  $C_{H,bep_{exp}}$  é o fator de correção calculado experimentalmente e  $C_{H,bep_{literatura}}$  é o fator de correção obtidos pelos métodos propostos por Stepanoff (1949)/TUALP (2006), Gülich (2008) e a norma ANSI-HI 9.6.7 (2010).

Os resultados da Tabela 4.11 revelam que os fatores de correção fornecidos pela metodologia proposta por Gülich (2008) é a que apresenta o maior desvio em relação ao valor calculado experimentalmente. Para a viscosidade de 1069 cP, observa-se um erro de -20,7%.

Tabela 4.11 – Fatores de correção de elevação em função da viscosidade para 1800 rpm.

<b>Fator de correção de elevação - <math>C_{H,bep}</math> 1800 rpm</b>							
<b>Viscosidade (cP)</b>	<b>Medido</b>	<b>Stepanoff (1949) (TUALP (2006))</b>	<b>Erro (%)</b>	<b>Gülich (2008)</b>	<b>Erro (%)</b>	<b>ANSI-HI (2010)</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>12</b>	0,992	0,993	-0,1	0,976	1,6	0,985	0,7
<b>33</b>	0,970	0,969	0,1	0,955	1,6	0,951	1,9
<b>76</b>	0,953	0,926	2,8	0,927	2,7	0,904	5,1
<b>115</b>	0,913	0,893	2,1	0,907	0,7	0,871	4,5
<b>188</b>	0,868	0,846	2,6	0,876	-0,9	0,825	5,0
<b>250</b>	0,842	0,815	3,2	0,854	-1,5	0,794	5,7
<b>355</b>	0,792	0,773	2,3	0,823	-4,0	0,753	4,8
<b>468</b>	0,739	0,738	0,2	0,795	-7,5	0,718	2,8
<b>602</b>	0,729	0,706	3,1	0,767	-5,2	0,686	5,9
<b>840</b>	0,606	0,661	-9,1	0,723	-19,4	0,639	-5,4
<b>1069</b>	0,571	0,629	-10,1	0,689	-20,7	0,604	-5,8



Para todos os métodos de correção, o erro aumenta com o incremento da viscosidade, sendo a metodologia proposta por Stepanoff(1949)/TUALP(2006) aquela que apresenta os menores desvios.

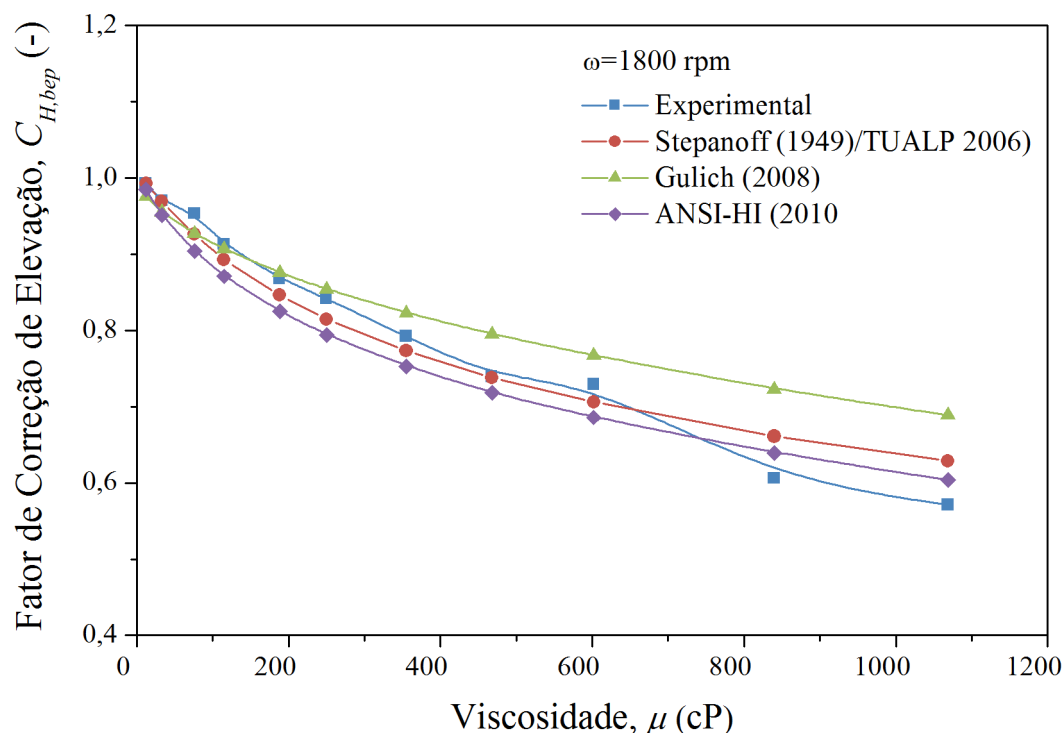


Figura 4.58 – Comparação entre os fatores de correção de elevação no BEP para 1800 rpm.

As comparações entre os fatores de correção de vazão, na rotação de 1800 rpm, são apresentadas na Tabela 4.12 e Figura 4.59.

Para o fator de correção de vazão, os resultados revelam um elevado desvio em todas as comparações. O método de correção proposto por Gülich (2008) apresenta os maiores desvios, que variam entre -9,4 a -152%. O método de Stepanoff (1949)/TUALP(2006) apresentam os menores desvios, que variam entre -11 a -82%. Os erros negativos em ambas as comparações indicam que a vazão corrigida pelos métodos é maior que a vazão medida experimentalmente. A utilização dessas correlações no projeto do sistema de bombeamento ocasionaria o subdimensionamento da BCS, resultando em uma vazão produzida menor que a desejada.

Além do considerável erro em relação ao valor medido experimentalmente, esses resultados relevam uma elevada discrepância entre os três métodos de correção. Observa-se que os desvios aumentam com o incremento da viscosidade.

Tabela 4.12 – Fatores de correção de vazão em função da viscosidade para 1800 rpm.

Fator de correção de vazão - $C_{q,bep}$ 1800 rpm							
Viscosidade (cP)	Medido	Stepanoff (1949) (TUALP (2006))	Erro (%)	Gulich (2008)	Erro (%)	ANSI-HI (2010)	Erro (%)
12	0,892	0,990	-11,0	0,976	-9,4	0,985	-10,4
33	0,795	0,954	-20,0	0,955	-20,0	0,951	-19,6
76	0,710	0,891	-25,4	0,927	-30,5	0,904	-27,3
115	0,676	0,844	-25,0	0,907	-34,2	0,871	-29,0
188	0,619	0,778	-25,8	0,876	-41,6	0,825	-33,3
250	0,573	0,735	-28,4	0,854	-49,1	0,794	-38,7
355	0,523	0,680	-30,1	0,823	-57,5	0,753	-44,1
468	0,473	0,634	-34,2	0,795	-68,2	0,718	-52,0
602	0,410	0,593	-44,9	0,767	-87,2	0,686	-67,4
840	0,352	0,538	-52,9	0,723	-105,7	0,639	-81,7
1069	0,273	0,498	-82,4	0,689	-152,1	0,604	-121,0

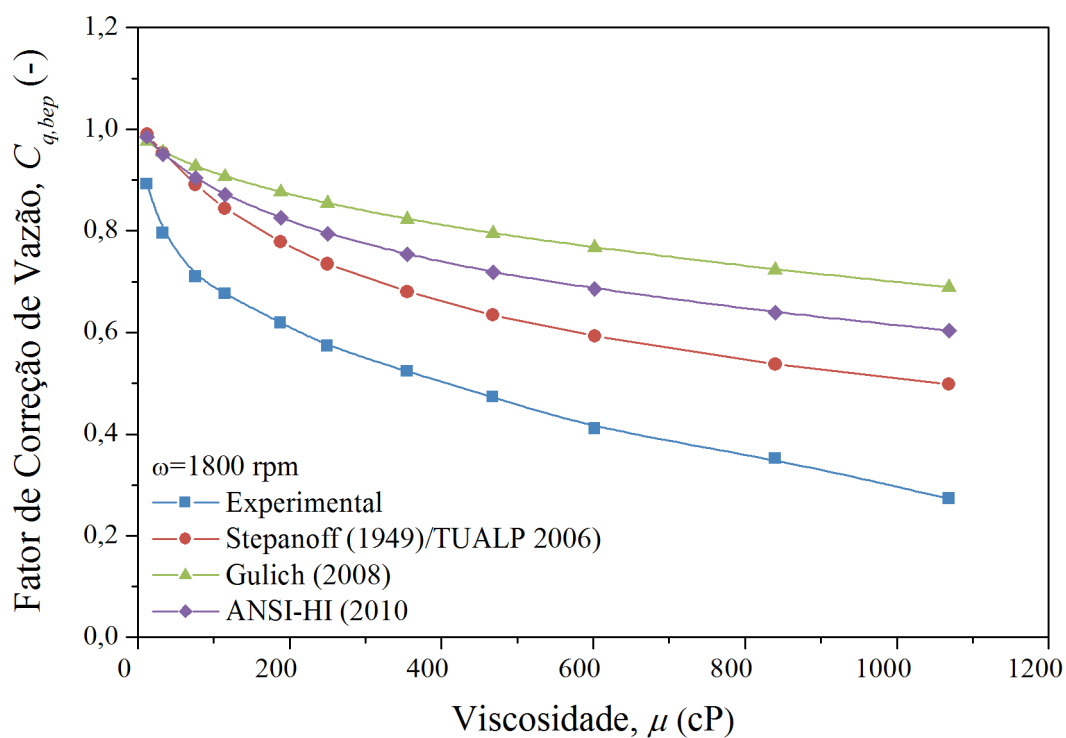


Figura 4.59 – Comparação entre os fatores de correção de vazão no BEP para 1800 rpm.

As comparações entre os fatores de correção de elevação, na rotação de 3500 rpm, são apresentadas na Tabela 4.13 e Figura 4.60.

A análise desses resultados revela que os erros dos fatores de correção de elevação na rotação de 3500 rpm são semelhantes aos verificados na rotação de 1800 rpm. No entanto, para a rotação de 3500 rpm, a metodologia proposta por Gülich (2008) fornece o menor erro médio. Nesse caso, os desvios variam entre 0 a 7,1%. Os maiores desvios são observados para o método ANSI-HI (2010), em que os erros variam entre 0,2 a 11,3%.

Nesse caso, os erros verificados são positivos, indicando que os fatores de correção experimentais são maiores que os previstos pelos métodos analisados. Isso indica que a degradação da altura de elevação verificada experimentalmente é menor que o previsto pelas correções.

Tabela 4.13 – Fatores de correção de elevação em função da viscosidade para 3500 rpm.

<b>Fator de correção de elevação - <math>C_{H,bep}</math> 3500 rpm</b>							
<b>Viscosidade (cP)</b>	<b>Medido</b>	<b>Stepanoff (1949) (TUALP (2006))</b>	<b>Erro (%)</b>	<b>Gülich (2008)</b>	<b>Erro (%)</b>	<b>ANSI-HI (2010)</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>12</b>	0,998	0,999	-0,1	0,985	1,3	0,995	0,2
<b>33</b>	0,999	0,992	0,7	0,971	2,8	0,977	2,2
<b>76</b>	0,998	0,972	2,6	0,952	4,7	0,945	5,4
<b>114</b>	0,985	0,955	3,1	0,938	4,7	0,922	6,4
<b>188</b>	0,973	0,924	5,0	0,917	5,8	0,886	9,0
<b>251</b>	0,971	0,902	7,1	0,902	7,1	0,861	11,3
<b>352</b>	0,924	0,871	5,7	0,880	4,7	0,829	10,3
<b>471</b>	0,88	0,842	4,4	0,859	2,4	0,798	9,3
<b>600</b>	0,838	0,815	2,8	0,839	0,0	0,770	8,1
<b>836</b>	0,813	0,776	4,6	0,807	0,7	0,729	10,2

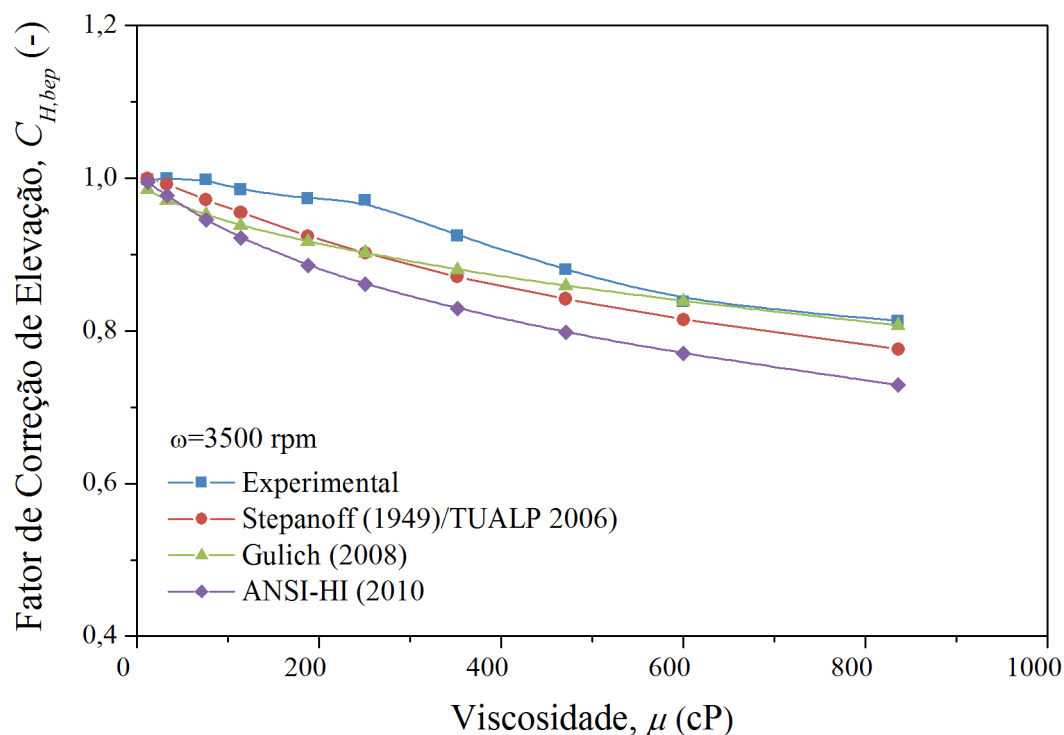


Figura 4.60 – Comparação entre os fatores de correção de elevação no BEP para 3500 rpm.

As comparações entre os fatores de correção de vazão, na rotação de 3500 rpm, são apresentadas na Tabela 4.14 e Figura 4.63.

Essas comparações revelam elevados desvios entre os fatores de correção medidos e os previstos pelos métodos de correção. Os maiores desvios são observados para a correlação fornecida por Gülich (2008), em que os erros variam de -2,2 a -59,2%. Os menores desvios são observados para a correlação de Stepanoff (1949)/TUALP (2006), em que os erros variam de -3,7% a -34,8%. Em todas as comparações o desvio aumenta com o incremento da viscosidade.

Nessas comparações todos os erros são negativos, indicando que o fator de correção experimental é menor que o previsto pela norma. Portanto, a diminuição da vazão devido aos efeitos viscosos é mais acentuada do que a prevista pelos métodos de correção analisados.

Os elevados desvios observados nas comparações acima podem ser explicados analisando-se o limite de aplicação dos métodos de correção.

O método proposto por Gülich (2008) é recomendado para  $310 < N_s < 2300$ , enquanto a norma ANSI-HI (2010) é válida para  $N_s < 3000$ . A BCS GN5200 apresenta velocidade específica de  $N_s = 3600$ , portanto fora dos limites de aplicações desses dois métodos.

Tabela 4.14 – Fatores de correção de vazão em função da viscosidade para 3500 rpm

Fator de correção de vazão - $C_{q,bep}$ 3500 rpm							
Viscosidade (cP)	Medido	Stepanoff (1949) (TUALP (2006))	Erro (%)	Gulich (2008)	Erro (%)	ANSI-HI (2010)	Erro (%)
12	0,963	0,999	-3,7	0,985	-2,2	0,995	-3,4
33	0,860	0,988	-14,8	0,971	-12,8	0,977	-13,5
76	0,798	0,959	-20,2	0,952	-19,3	0,945	-18,4
114	0,739	0,933	-26,2	0,938	-27,0	0,922	-24,7
188	0,684	0,888	-29,9	0,917	-34,1	0,886	-29,6
251	0,643	0,856	-33,0	0,902	-40,1	0,861	-33,8
352	0,622	0,813	-30,8	0,880	-41,5	0,829	-33,2
471	0,602	0,772	-28,3	0,859	-42,8	0,798	-32,6
600	0,567	0,736	-29,8	0,839	-47,9	0,770	-35,9
836	0,507	0,683	-34,8	0,807	-59,2	0,729	-43,9

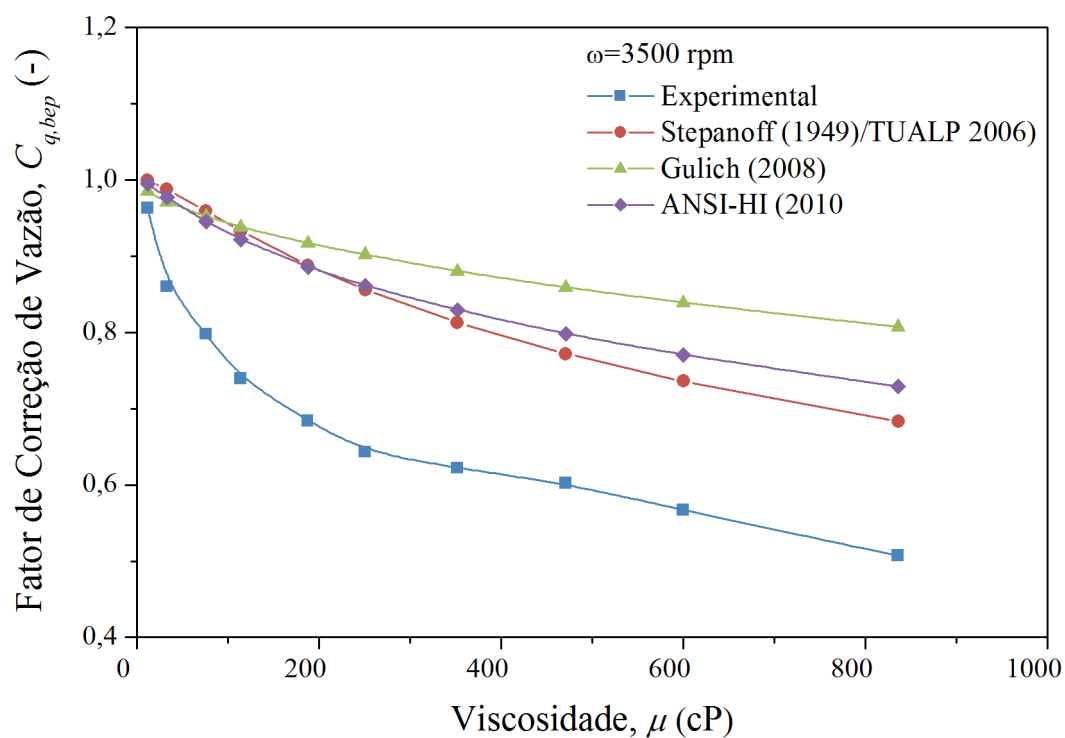


Figura 4.61 – Comparação entre os fatores de correção de vazão no BEP para 3500 rpm.

As correlações de Gülich (2008) e da normal ANSI-HI foram obtidas com base em testes de desempenho de bombas de volutas, de grandes diâmetros e geometrias radiais. Em geral, BCSs possuem pequenos diâmetros, geometria de fluxo misto, resultando em velocidades específicas maiores que os limites recomendados por esses procedimentos.

Em relação à metodologia proposta por Stepanoff (1949)/TUALP (2006), a única recomendação para a aplicação do método está relacionada ao número de Reynolds de Stepanoff. Nesse caso, a BCS GN5200 atende os critérios de aplicação do método.

O procedimento de correção de Stepanoff (1949) é baseado na consideração que a velocidade específica, para uma determinada rotação, permanece constante no ponto de melhor eficiência, resultando em:

$$C_{q,bep} = C_{H,bep}^{1,5} \quad (4.3)$$

No entanto, a Figura 4.64 revela que a consideração feita no Stepanoff (1949), mostrada na Equação (4.3), não é válida para os resultados calculados com base nos experimentos. Isso implica, diretamente, a obtenção do fator de correção de elevação, explicando nos elevados desvios observados nas Tabela 4.12 e Tabela 4.14.

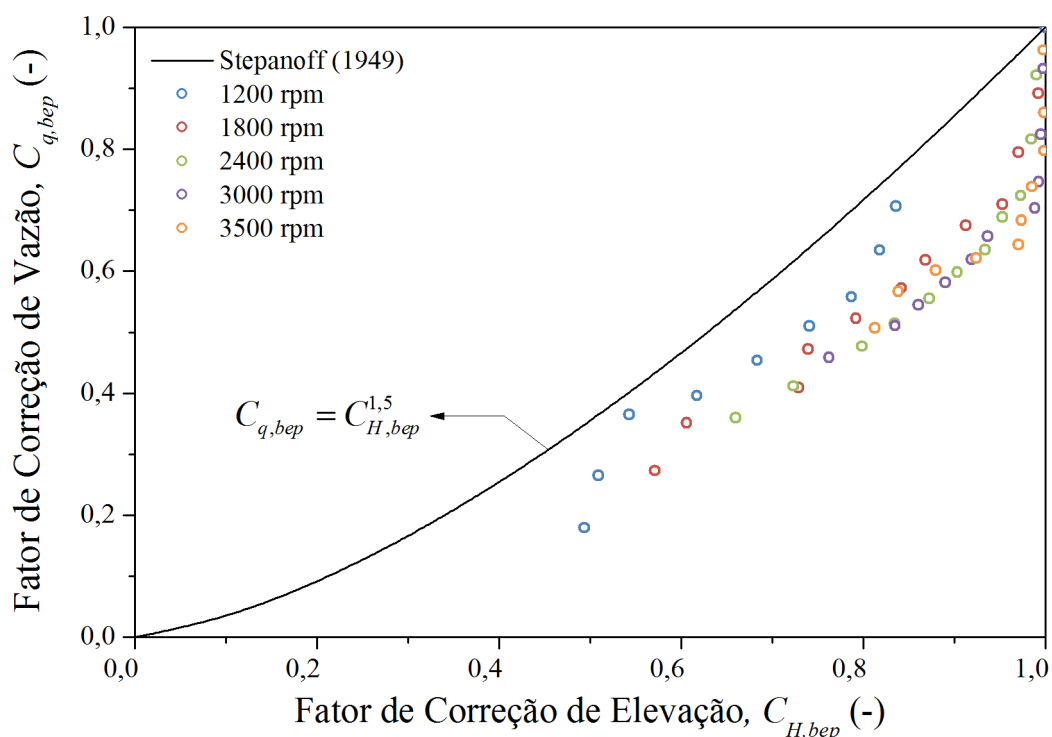


Figura 4.62 – Comparação entre os fatores de correção de vazão e elevação experimentais e os previstos por Stepanoff (1949).

#### 4.2.1.3 Metodologia Proposta para o Cálculo dos Fatores de Correção Viscosos

Os elevados desvios entre os fatores de correção experimentais e os previstos pelos principais métodos da literatura, revelam a necessidade de correlações específicas para BCSs.

Portanto, baseado nos resultados experimentais da BCS GN5200, foram ajustadas correlações empíricas para os fatores de correção viscosos. As correlações propostas seguem uma relação funcional semelhante a proposta por Gülich (2008). No entanto, as constantes das correlações são ajustadas especificamente para os dados experimentais.

Os coeficientes de correção viscosos são função do número de Reynolds modificado, definido na Equação (2.91). Os ajustes das correlações empíricas para os fatores de correção de elevação, vazão e eficiência são apresentados na Figura 4.63, Figura 4.64 e Figura 4.65, respectivamente.

As correlações ajustadas são dadas pelas Equações (4.4), (4.5) e (4.6).

$$C_{H,bep} = Re_{mod}^{-\left(\frac{145,965}{Re_{mod}^{1,139}}\right)} \quad (4.4)$$

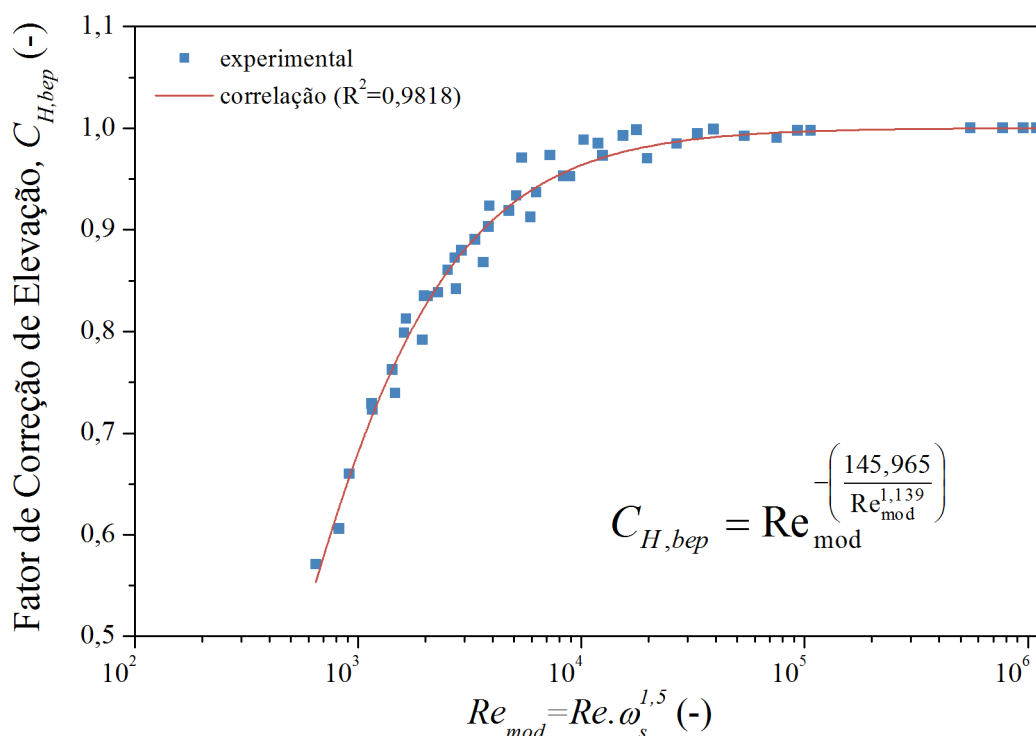


Figura 4.63 – Correlação experimental para o fator de correção de elevação no BEP.

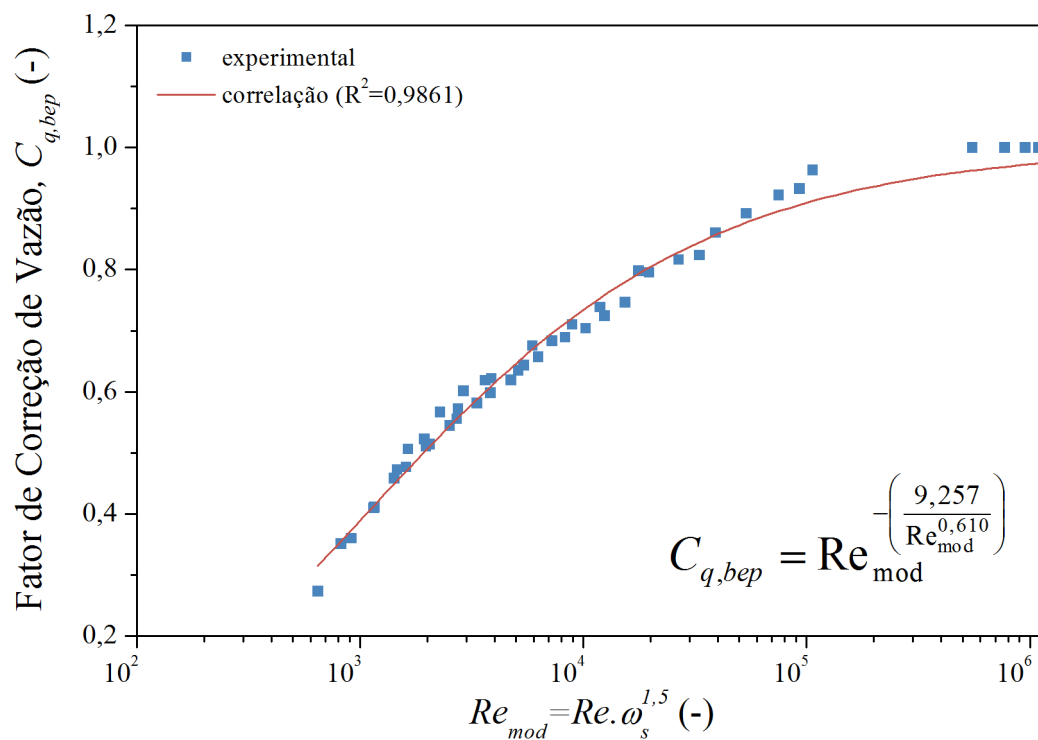


Figura 4.64 – Correlação experimental para o fator de correção de vazão no BEP.

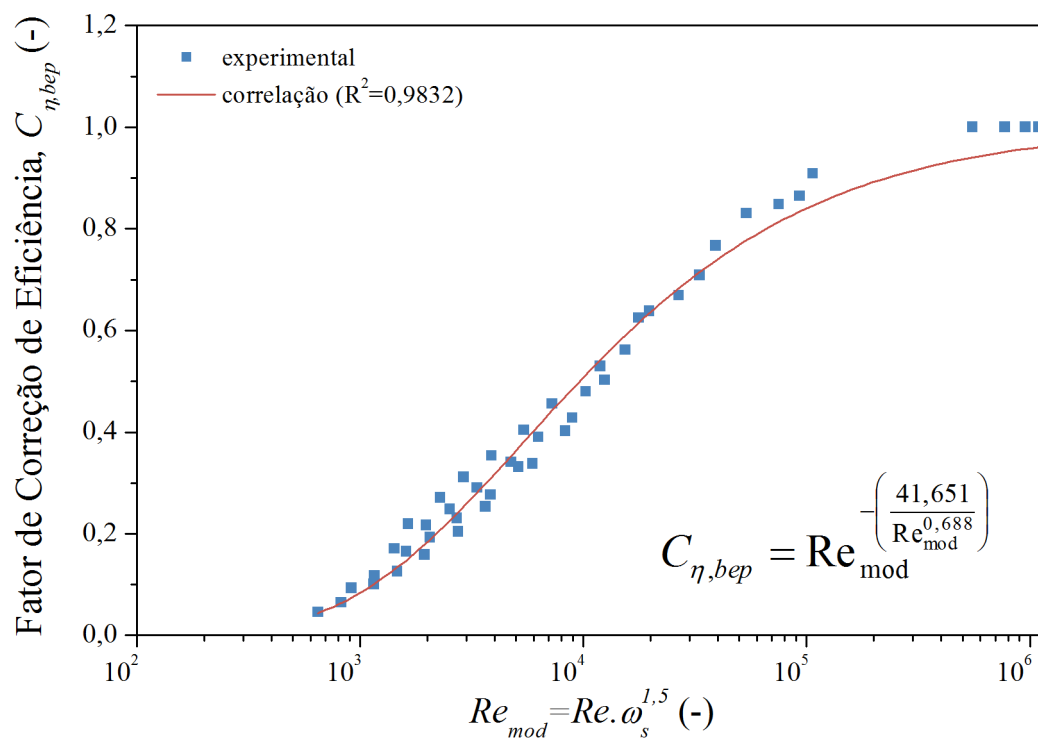


Figura 4.65 – Correlação experimental para o fator de correção de eficiência no BEP.



$$C_{q,bep} = Re_{mod}^{-\left(\frac{9,257}{Re_{mod}^{0,610}}\right)} \quad (4.5)$$

$$C_{\eta,bep} = Re_{mod}^{-\left(\frac{41,651}{Re_{mod}^{0,688}}\right)} \quad (4.6)$$

O fluxograma com o procedimento de correção é mostrado na Figura 4.66. As variáveis de entrada são a rotação  $\omega$  em rad/s, o raio externo do impelidor  $r_2$  em m, a viscosidade cinemática do fluido viscoso  $\nu$  em  $m^2/s$ , a altura de elevação no BEP por estágio com água  $H_{w,bep}$  em m, a vazão no BEP com água  $q_{w,bep}$  em  $m^3/s$ , e a eficiência no BEP com água em %.

A metodologia é baseada, apenas, no desempenho de referência com água, tornando o procedimento de cálculo direto. A aplicação dessas correlações empíricas é válida, apenas, para o BEP, sendo recomendada para  $6 \cdot 10^2 < Re_{mod} < 10^6$  e  $1800 < \omega < 3500 \text{ rpm}$ .

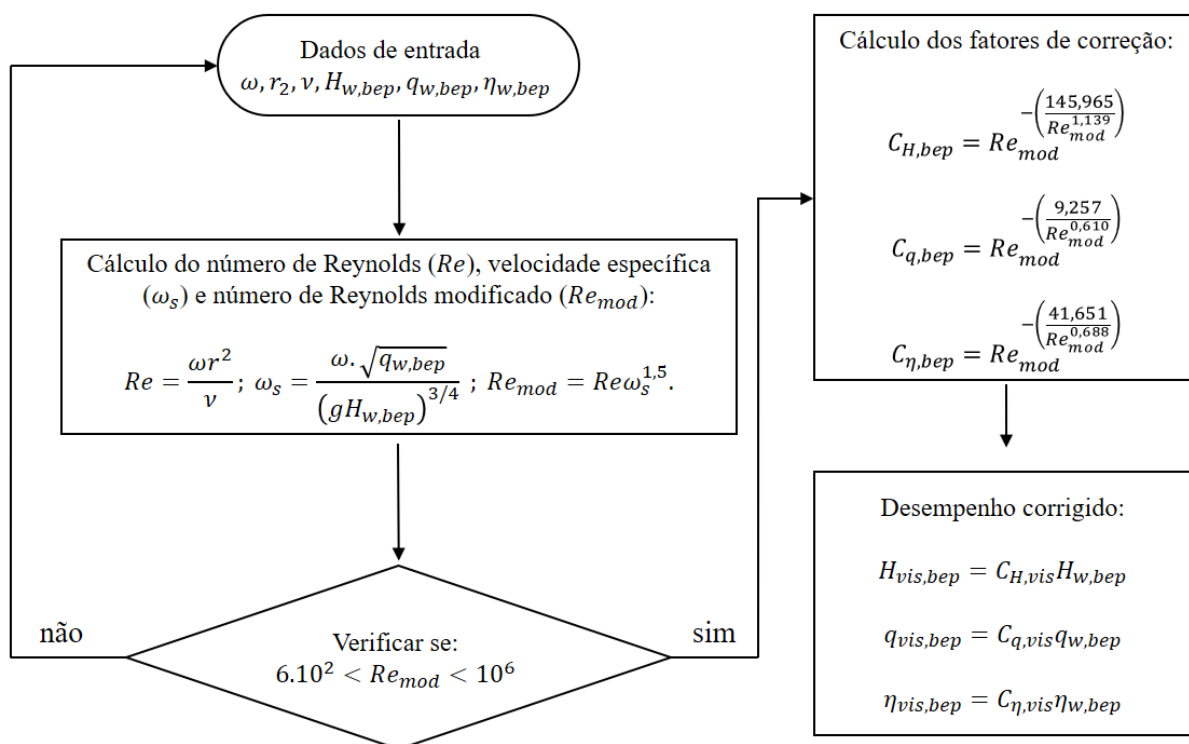


Figura 4.66 – Fluxograma de correção de desempenho.

## 4.2.2 Testes Bifásicos Água-Ar

Nesta seção, são apresentados os resultados do desempenho bifásico da BCS GN5200 operando com escoamento água-ar. Esses testes têm como objetivo investigar quais os efeitos da pressão de sucção, rotação, frações de gás e inclinação da instalação no desempenho da BCS.

Os testes bifásicos foram realizados utilizando-se o procedimento de vazão de líquido constante. As vazões de líquido escolhidas para a matriz experimental são definidas nos testes monofásico com água, sendo utilizados o ponto do BEP e os limites de  $\pm 25\%$  do BEP. A escolha do procedimento experimental de vazão de líquido permite avaliar o desempenho da BCS nas condições de projeto, em que é recomendada a operação do equipamento.

### 4.2.2.1 Efeito da Pressão de Entrada

Os efeitos da pressão de entrada no desempenho bifásico da BCS, nas rotações de 2400, 3000 e 3500 rpm, são apresentados na Figura 4.67, Figura 4.68 e Figura 4.69, respectivamente. Os testes foram realizados na vazão de líquido do BEP e pressões de entrada variando entre 200 a 800 kPa. Nessas figuras, o incremento de pressão da mistura é apresentado na forma normalizada, em que o incremento de pressão na operação monofásica utilizado como referência, tal que:

$$\Delta P_n = \frac{\Delta P_M}{\Delta P_{L,q_L=0}} \quad (4.7)$$

onde  $\Delta P_n$  é o incremento de pressão normalizado,  $\Delta P_M$  é incremento de pressão da mistura bifásica e  $\Delta P_{L,q_L=0}$  é o incremento de pressão monofásico máximo na condição de *shut-off*.

Para frações de gás inferiores a 2%, praticamente não há influência da pressão de entrada no desempenho da bomba. Porém, acima de 2% observa-se uma tendência de aumento de desempenho devido ao incremento de pressão de entrada. Possivelmente, a pressão de entrada atua no diâmetro das bolhas na sucção da bomba. Com a elevação da pressão o diâmetro das bolhas se reduz, dificultando sua coalescência. Isso faz com que a transição do padrão de escoamento no interior do impelidor ocorra para frações de gás maiores, deslocando o ponto de *Surging* para a direita da curva de desempenho.

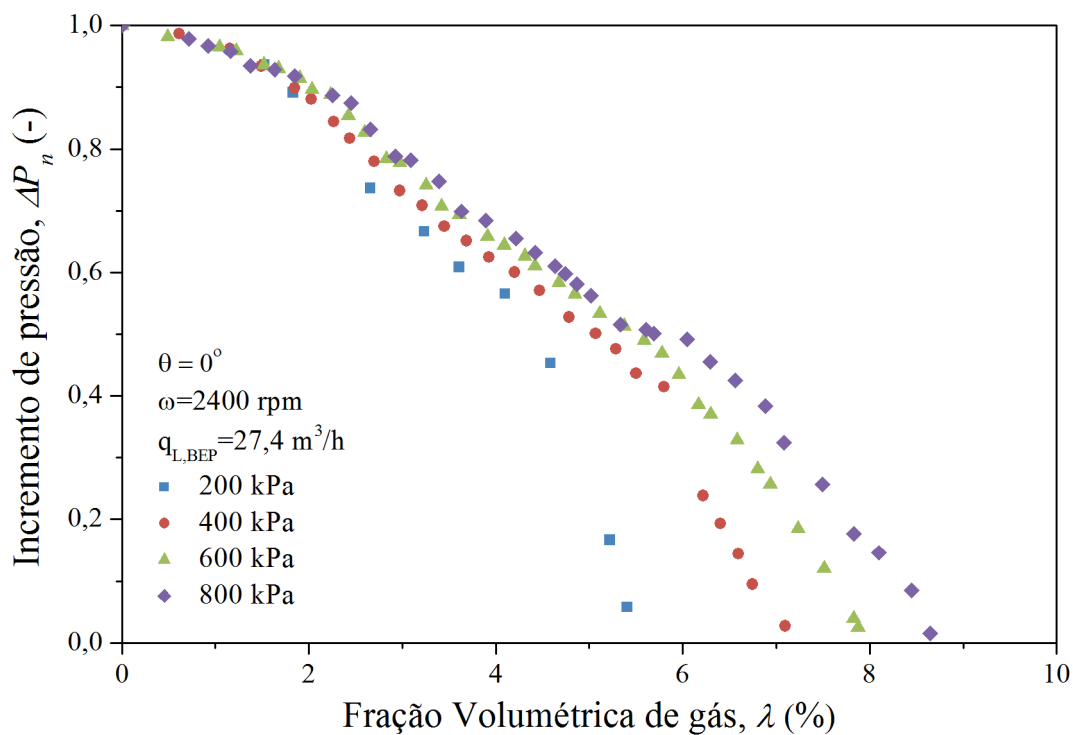


Figura 4.67 – Efeito da pressão de entrada no desempenho bifásico da BCS GN5200, rotação de 2400 rpm e vazão de líquido no BEP.

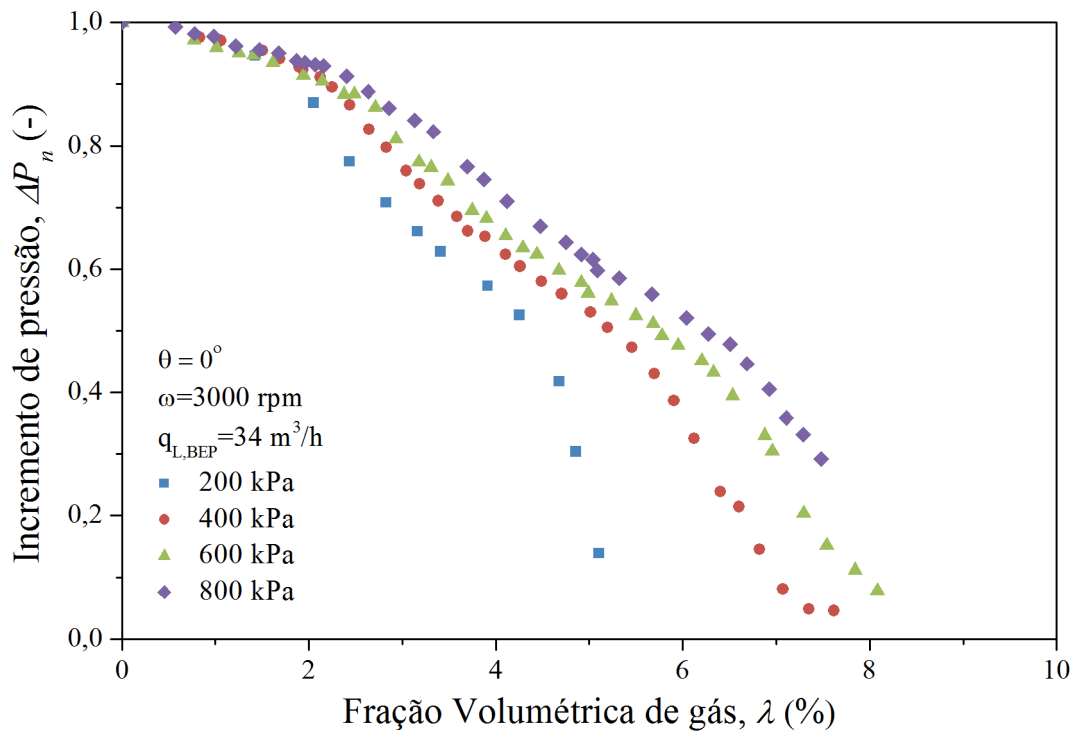


Figura 4.68 – Efeito da pressão de entrada no desempenho bifásico da BCS GN5200, rotação de 3000 rpm e vazão de líquido no BEP.

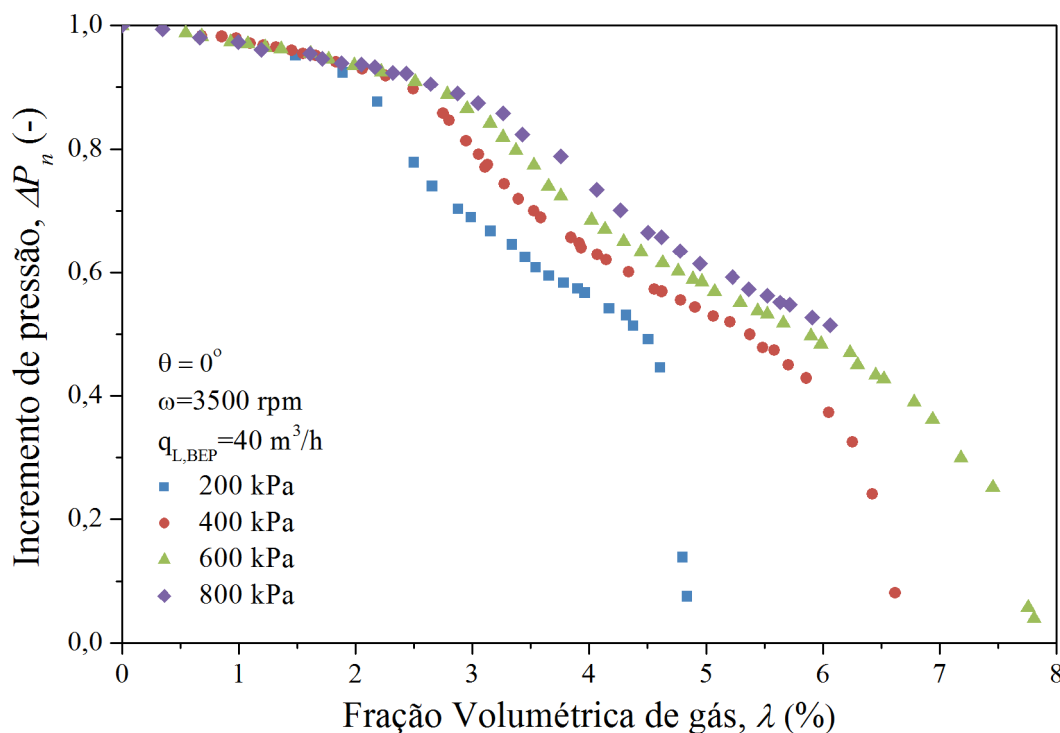


Figura 4.69 – Efeito da pressão de entrada no desempenho bifásico da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm e vazão de líquido no BEP.

A massa específica do gás, também, é influenciada pela pressão de entrada. Devido à compressibilidade da fase gasosa, o incremento da pressão de sucção resulta no aumento da massa específica, reduzindo a diferença entre as densidades das fases. A redução da diferença entre as massas específicas diminui o efeito de segregação causada pelo campo centrífugo, contribuindo para a melhoria de desempenho da bomba.

Embora o aumento da pressão de entrada se mostre apropriado para aumentar a tolerância da bomba à presença de gás, nem sempre é possível sua aplicação em campo. O aumento da pressão de sucção da BCS diminui o diferencial de pressão entre o poço e o reservatório, prejudicando a produtividade. Portanto, algo indesejado.

#### 4.2.2.2 Efeito da Rotação da Bomba

A influência da rotação no desempenho bifásico da BCS GN5200 para as vazões de 0,75.BEP, BEP e 1,25.BEP, é apresentada na Figura 4.70, Figura 4.71 e Figura 4.72, respectivamente. Esses testes foram realizados com pressão de sucção de 600 kPa, inclinação de  $0^\circ$  e rotações de 2400, 3000 e 3500 rpm.

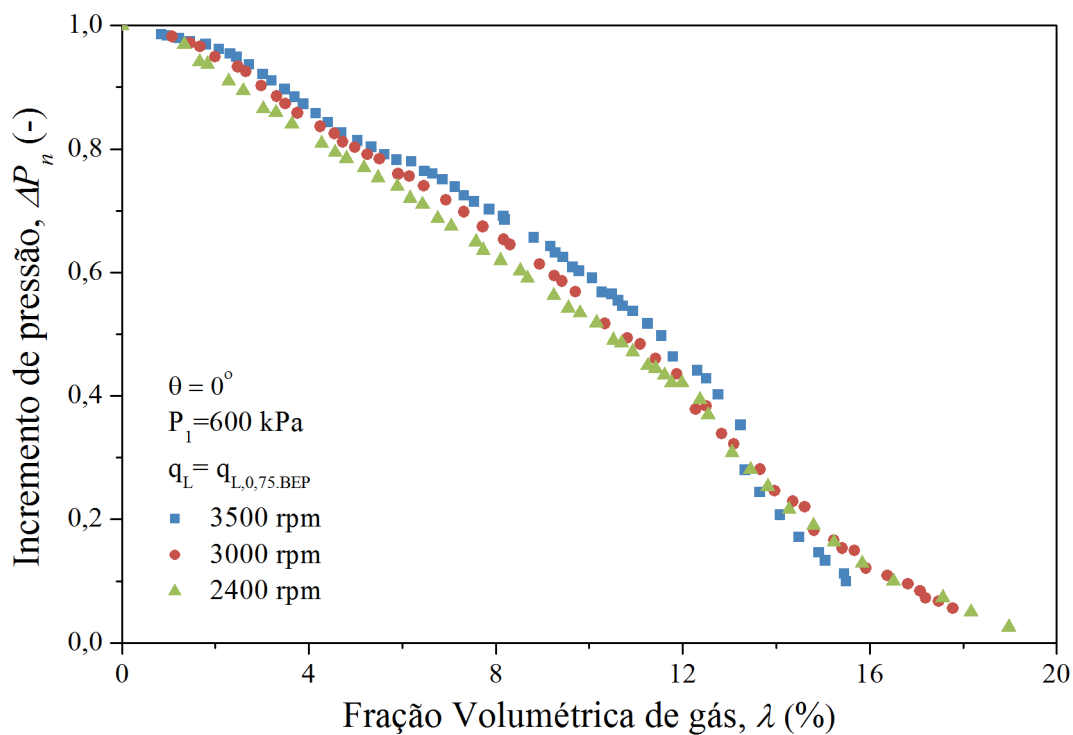


Figura 4.70 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 0,75.BEP.

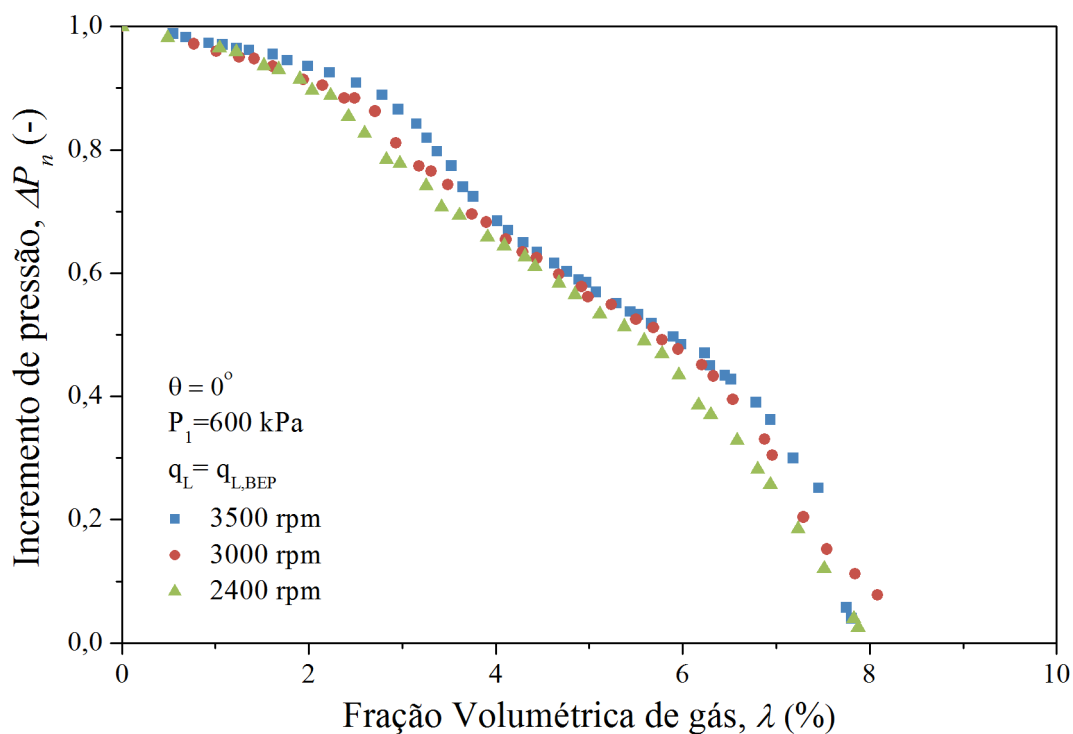


Figura 4.71 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido no BEP.

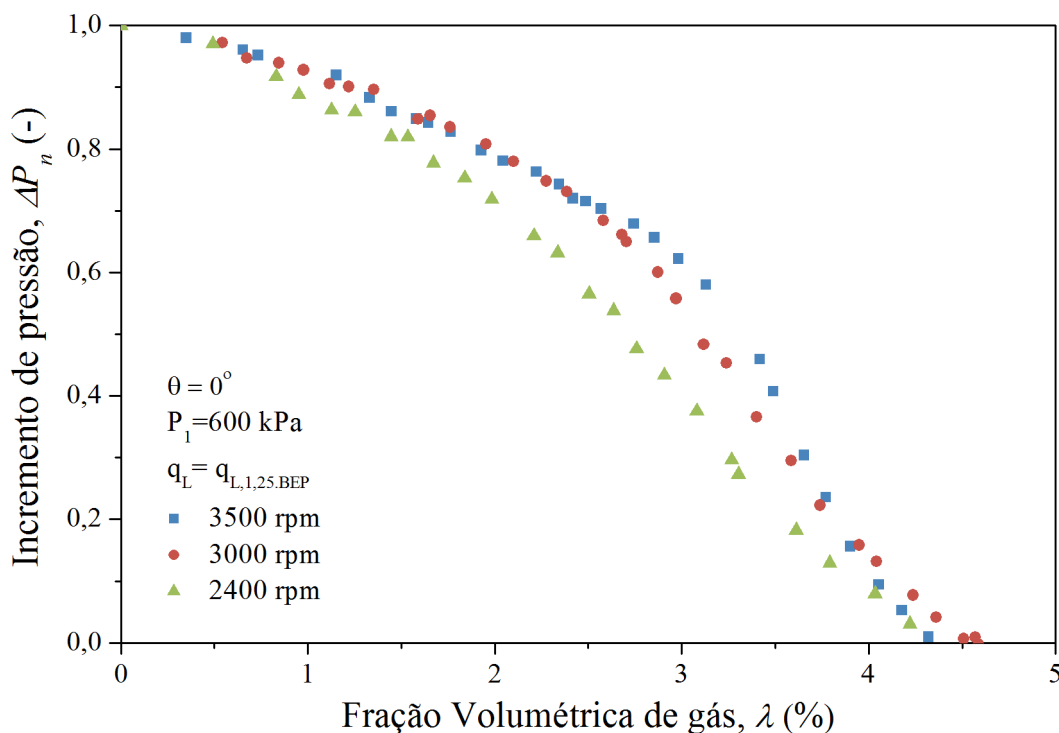


Figura 4.72 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 1,25.BEP.

Conforme observado na Figura 4.70 e Figura 4.71, para as vazões de 0,75.BEP e BEP, não existe uma influência considerável da rotação no desempenho bifásico da bomba. Os dados experimentais, nas diferentes rotações, descrevem curvas semelhantes.

Porém, para a vazão de 1,25.BEP, é observada uma melhora no desempenho da bomba em função do aumento da rotação. O aumento da pressão influencia inversamente na força de arrasto e na força devido ao gradiente de pressão que atuam nas bolhas de gás. Aparentemente, na vazão de 1,25.BEP a força de arrasto que desloca a bolha para a fora do impelidor é mais afetada pela rotação, em relação a força devido à pressão, aumentando a tolerância da bomba a presença de gás.

#### 4.2.2.3 Incremento de Pressão por Estágio

O incremento de pressão por estágio da BCS GN5200 para as vazões de 0,75.BEP, BEP e 1,25.BEP, é apresentado na Figura 4.73, Figura 4.74 e Figura 4.75, respectivamente. Esses testes foram realizados com pressão de sucção de 600 kPa, inclinação de  $0^\circ$  e rotação de 3500 rpm.

Esses resultados revelam a tendência do primeiro estágio de apresentar uma maior degradação em relação aos demais. Nos testes com vazão de 0,75.BEP, Figura 4.73, observa-se que o primeiro estágio atinge a condição de *Surging* para  $\lambda \approx 2,5\%$  enquanto os demais estágios têm a intensificação na queda do desempenho para frações de gás superiores a  $\lambda > 10\%$ .

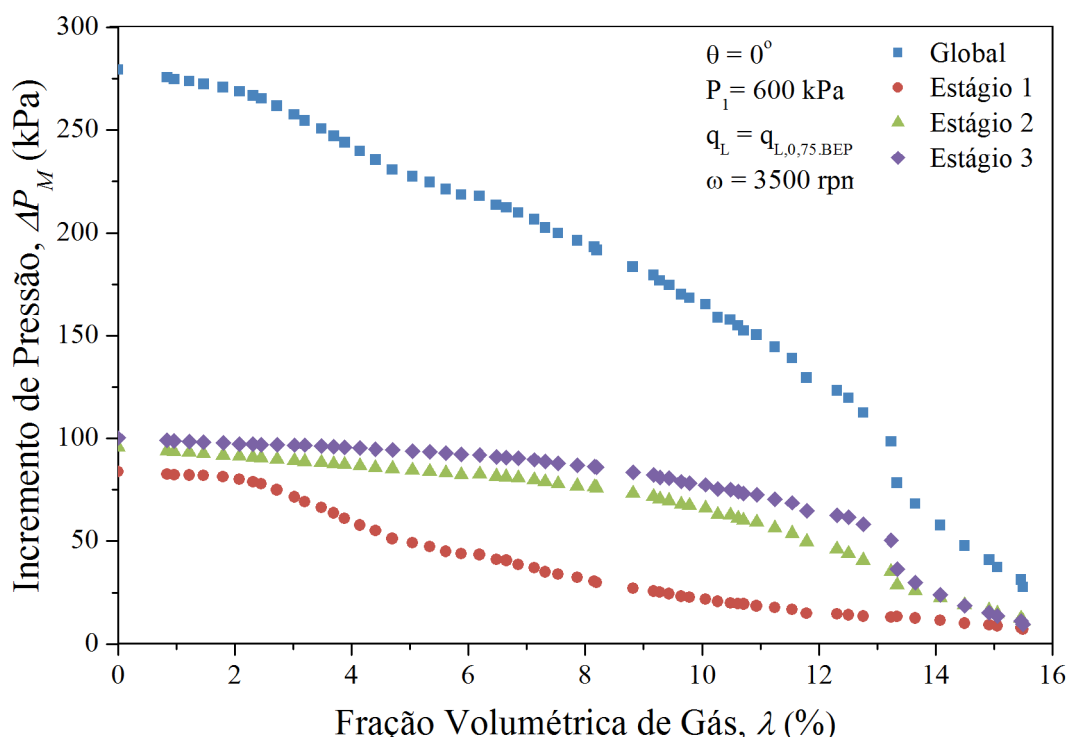


Figura 4.73 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 0,75.BEP.

Para a vazão do BEP, Figura 4.74, a degradação do desempenho do primeiro estágio é ainda mais intensa. O ponto de *Surging* do primeiro estágio ocorre em  $\lambda \approx 2,7\%$ , enquanto o bloqueio de gás é observado para  $\lambda \approx 5\%$ . A partir dessa fração de gás o incremento de pressão é negativo e o primeiro estágio começa a representar uma perda de carga ao escoamento. O desempenho do segundo e terceiros estágios diminuem de forma semelhante até  $\lambda \approx 6,0\%$ , em que o segundo estágio atinge a condição de *Surging*. O *Surging* do terceiro estágio acontece para  $\lambda \approx 7,0\%$ .

O aumento da tolerância do gás em função do número de estágios pode ser explicada por dois fatores: a diminuição da fração volumétrica do gás ao longo dos estágios e o efeito de quebra de bolhas causadas pelo impelidor.

O incremento de pressão fornecido pelo estágio aumenta a massa específica do gás, diminuindo sua fração volumétrica na entrada do estágio seguinte. No entanto, na condição operacional de  $\lambda \approx 5\%$  da Figura 4.74, o primeiro estágio está em bloqueio e ainda assim, os demais estágios apresentam desempenho superior. Isso ocorre, provavelmente, devido ao efeito de quebra das bolhas promovido pelo primeiro estágio. A turbulência provocada pelas mudanças bruscas de direção na saída do impelidor e entrada do estator, promove a quebra das bolhas, homogeneizando a mistura entre as fases. Assim, o primeiro estágio, apesar de não fornecer pressão, é importante para manusear o gás, melhorando o desempenho dos estágios seguintes.

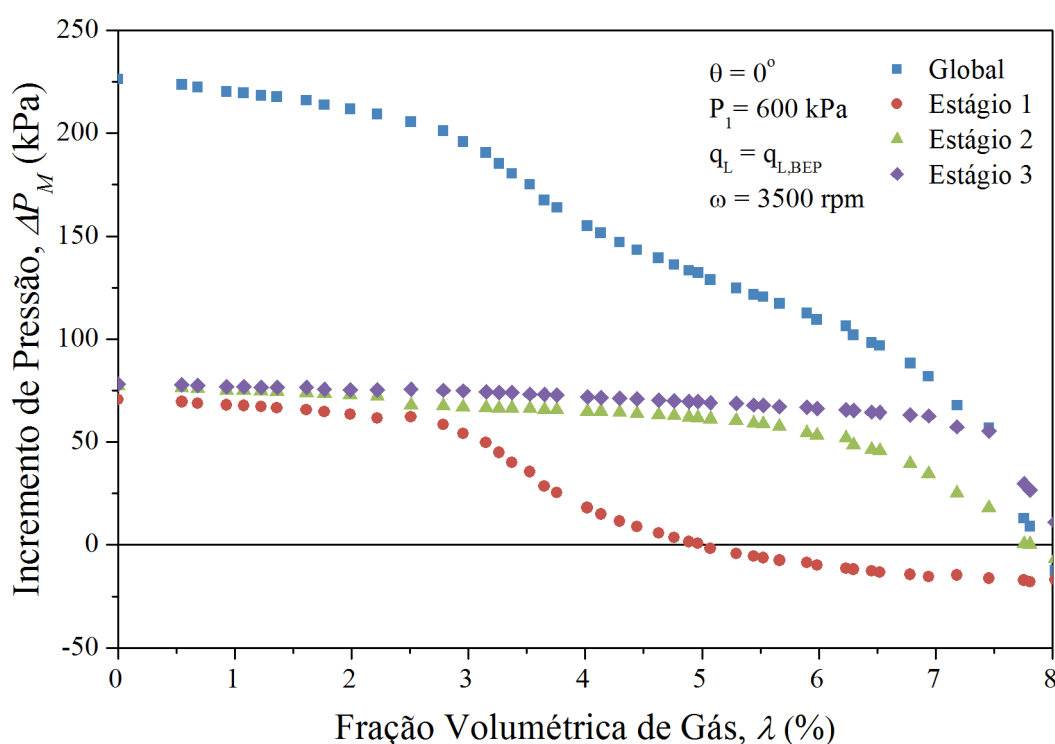


Figura 4.74 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido no BEP.

Para a vazão de  $1,25 \cdot \text{BEP}$ , Figura 4.75, os resultados revelam que os pontos de *Surging* e *Gas Locking* ocorrem para  $\lambda \approx 2,7\%$  e  $\lambda \approx 3,5\%$ , respectivamente. Nessa vazão, a perda de carga gerada pelo primeiro estágio é capaz de tornar nulo o incremento de pressão fornecido pela BCS para  $\lambda \approx 4,3\%$ , mesmo sendo positivas as pressões geradas pelos estágios dois e três.



Resultados semelhantes são observados para as demais rotações e pressões testadas. A avaliação desses resultados, mostrando a influência do número de estágios no desempenho da BCS, corrobora a ideia da utilização de BCS com diferentes geometrias de estágios.

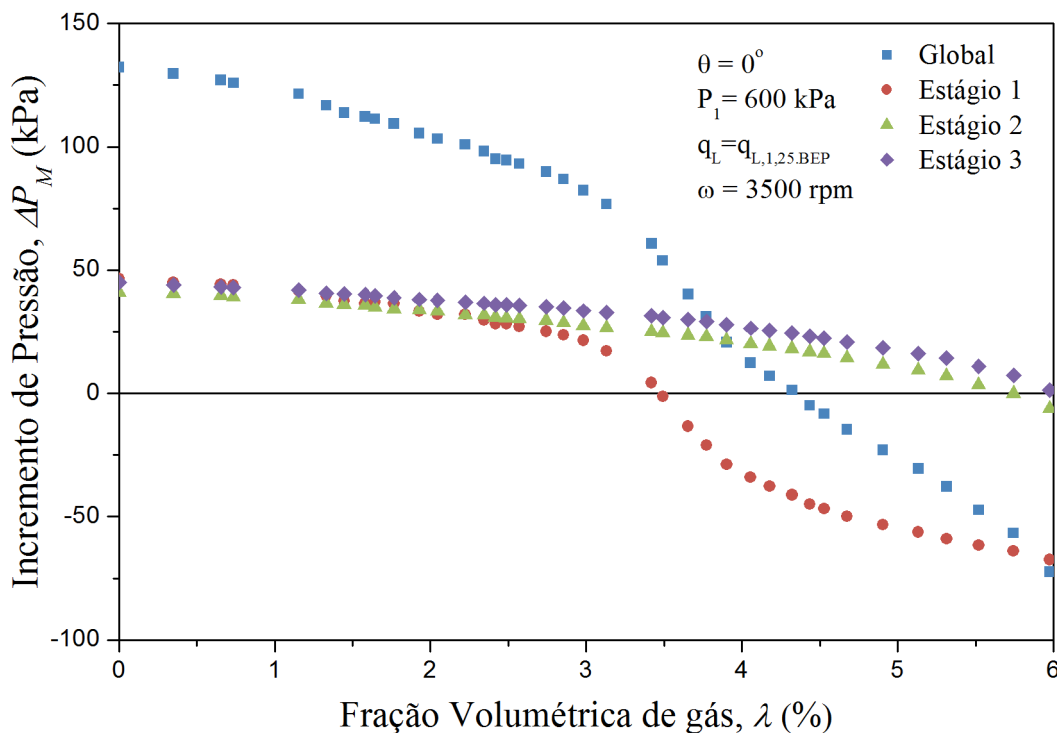


Figura 4.75 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 1,25.BEP.

#### 4.2.2.4 Efeito da Vazão de Líquido

Os efeitos da vazão de líquido no desempenho bifásico da BCS para as rotações de 2400, 3000 e 3500 rpm, são apresentados na Figura 4.76, Figura 4.77 e Figura 4.78, respectivamente. Para cada rotação são apresentados os desempenhos da BCS operando nas vazões do BEP e nos limites de  $\pm 25\%$ . Esses testes foram realizados na pressão de entrada de 600 kPa e inclinação de inclinação de  $0^\circ$ , sendo o desempenho apresentado na forma normalizada, conforme Equação (4.7).

Esses resultados revelam que, independentemente da rotação, a tolerância da bomba a presença de gás aumenta com a diminuição da vazão. Essa mesma tendência é observada para as demais pressões e inclinações observadas. Considerando uma rotação constante, a redução da vazão de líquido diminui a força de arrasto que tendem a carregar as bolhas para fora do impelidor. No entanto, quanto menor a vazão maior a pressão gerada pela bomba, sendo esse efeito maior do que aquele devido à redução da força de arrasto.

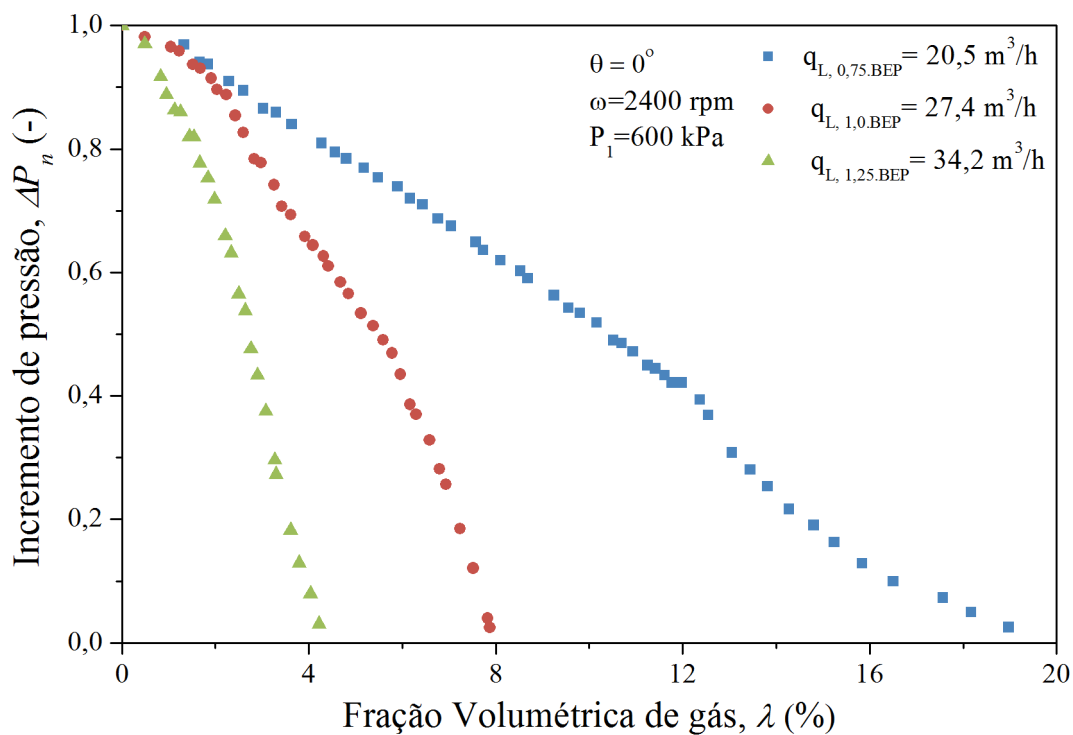


Figura 4.76 – Efeito da vazão de líquido no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e rotação de 2400 rpm.

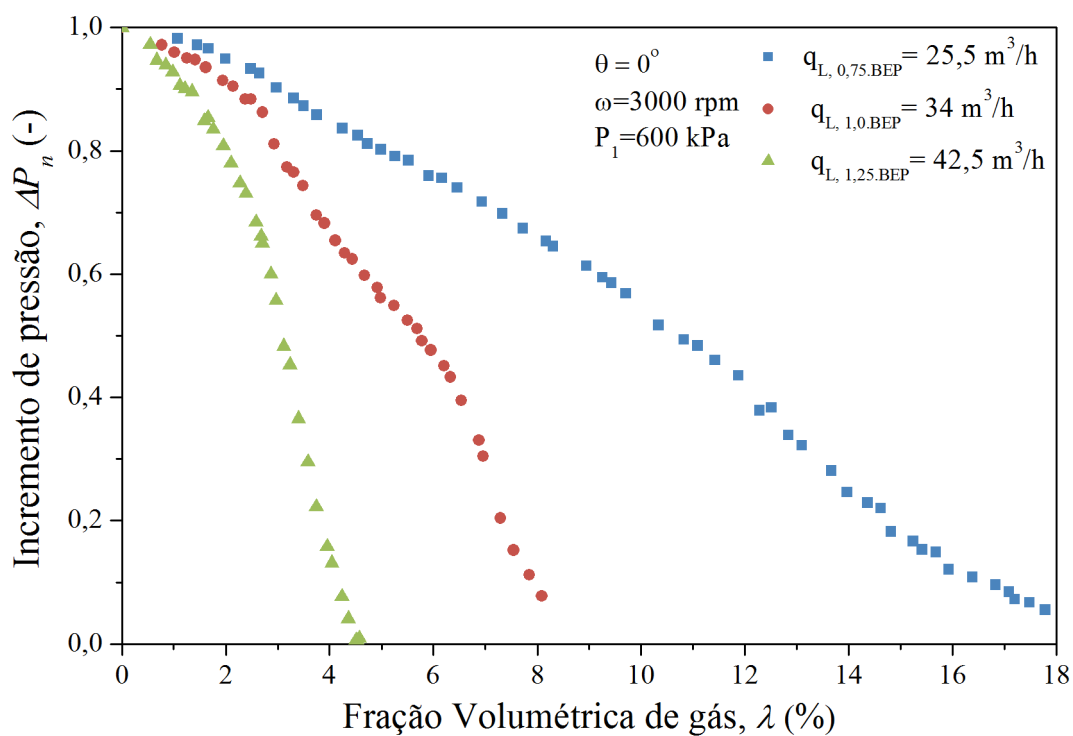


Figura 4.77 – Efeito da vazão de líquido no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e rotação de 3000 rpm.

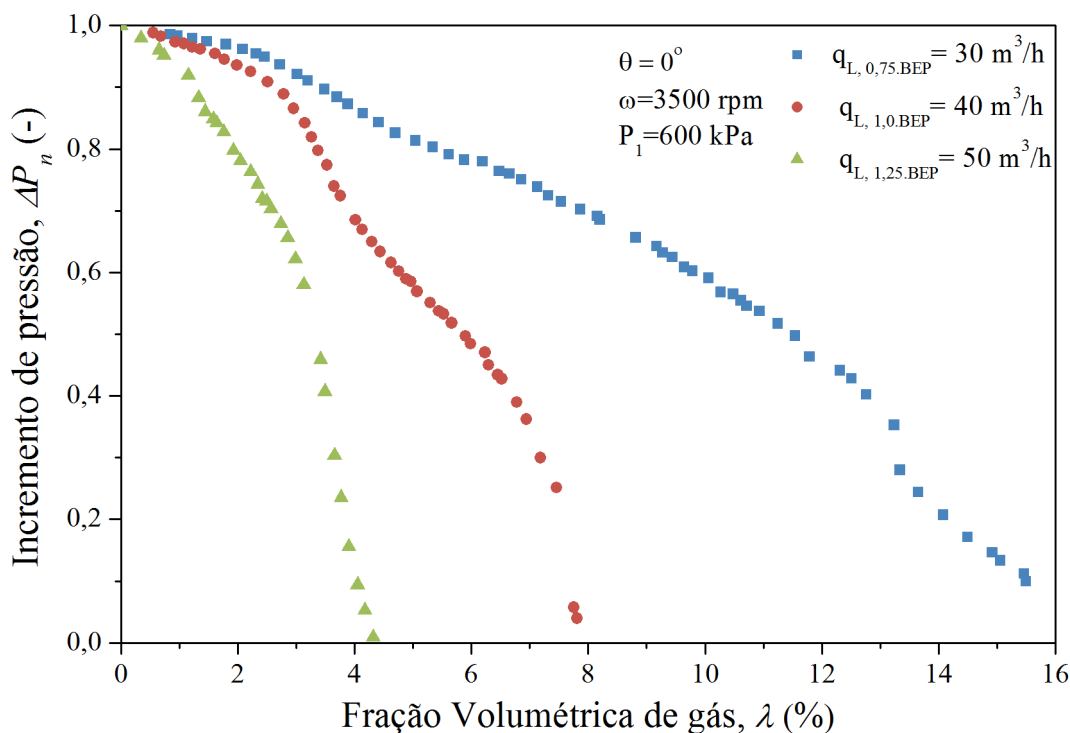


Figura 4.78 – Efeito da vazão de líquido no desempenho bifásico da BCS GN5200, pressão de sucção de 600 kPa e rotação de 3500 rpm.

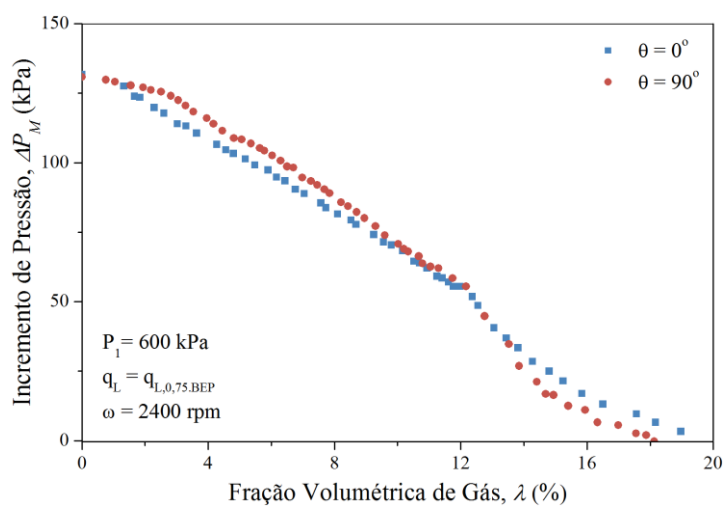
#### 4.2.2.5 Influência da Inclinação

Devido à flexibilidade na instalação do método de elevação artificial por BCS, foi conduzido um estudo para avaliar a influência da inclinação no desempenho bifásico da bomba. A Figura 4.79 e Figura 4.80 apresentam os resultados para os testes realizados nas rotações de 2400 e 3500 rpm, respectivamente. Esses resultados foram obtidos nas inclinações de  $0^\circ$  e de  $90^\circ$ , pressão de sucção de 600 kPa e vazões do BEP e  $\pm 25\%$  do BEP.

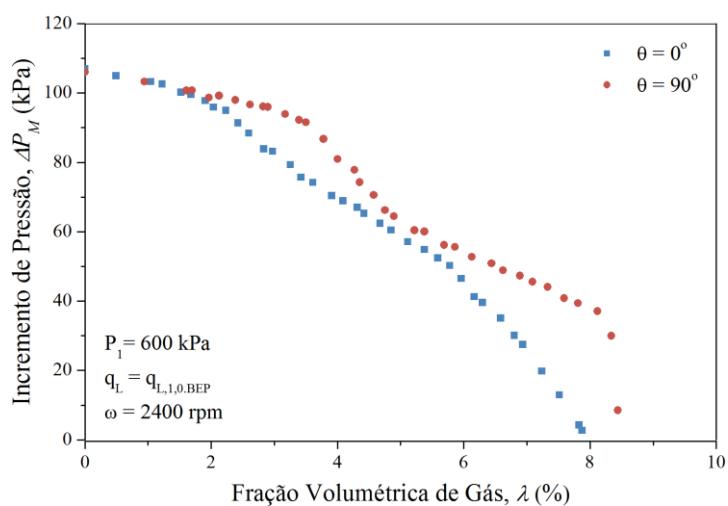
Esses resultados revelam que, independente da rotação, as curvas de desempenho apresentam as mesmas características. Para a vazão de 0,75.BEP, a influência da inclinação é pouco relevante e as curvas de desempenho à  $0^\circ$  e  $90^\circ$  são semelhantes.

Para a vazão do BEP, observa-se o efeito do campo gravitacional no desempenho bifásico da BCS. O ganho de pressão fornecido pela bomba na inclinação de  $90^\circ$  é superior ao ganho de pressão na posição horizontal. A fração de gás no ponto de *Surging* aumenta com a bomba operando verticalmente. Um efeito semelhante é observado para a vazão de 1,25.BEP.

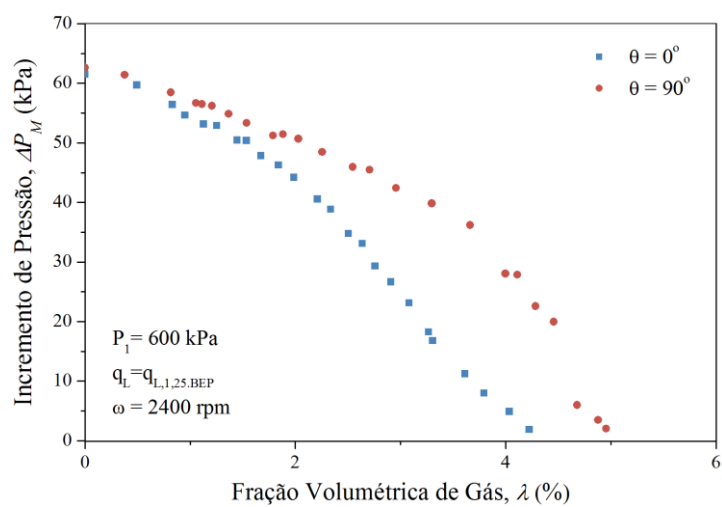
A influência da inclinação no ganho de pressão por estágio, nas vazões do BEP e 1,28.BEP é mostrada na Figura 4.81 e Figura 4.82, respectivamente.



(a)

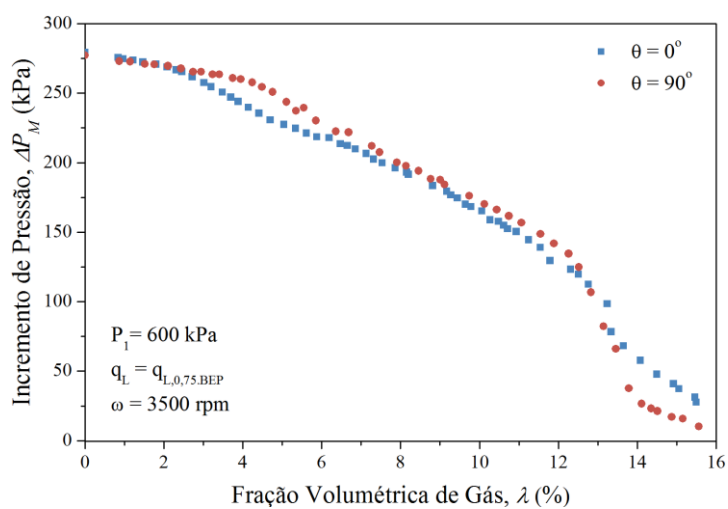


(b)

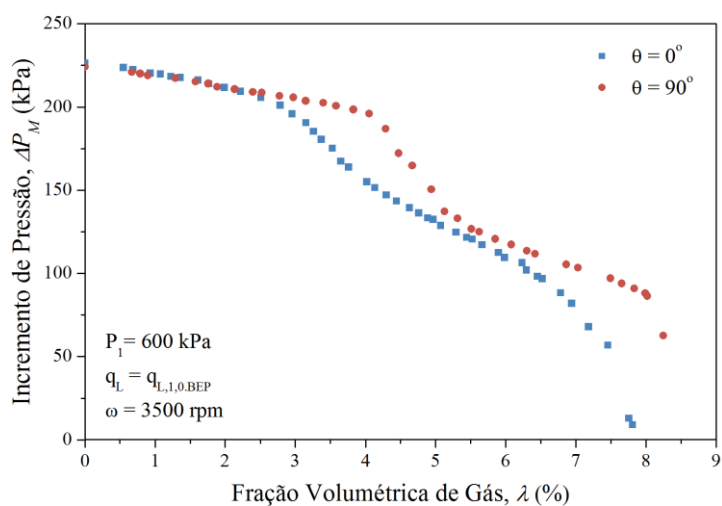


(c)

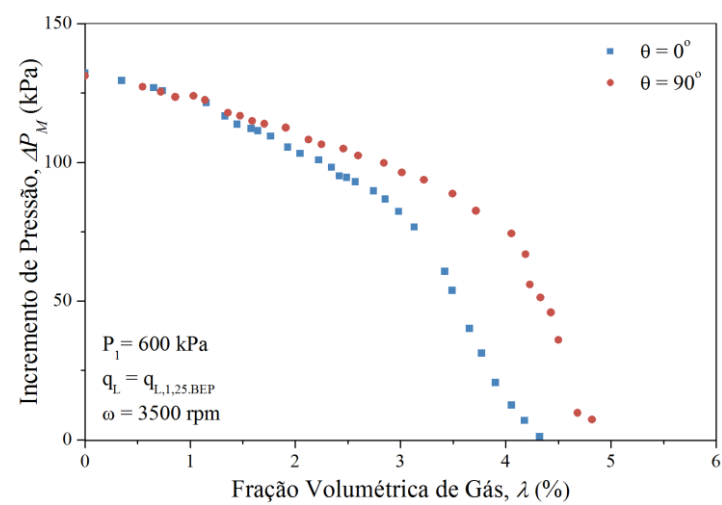
Figura 4.79 – Influência da inclinação no desempenho da BCS GN5200, rotação de 2400 rpm.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.80 – Influência da inclinação no desempenho da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm.

Para a vazão do BEP, Figura 4.81, é possível verificar que a mudança de inclinação de  $0^\circ$  para  $90^\circ$ , influencia no ponto de *Surging* de todos os estágios. A fração crítica de gás que caracteriza o início do *Surging* aumenta na operação na vertical, melhorando a tolerância da bomba a presença da fase compressível. Para as frações de gás menores que a fração crítica, não há influência da inclinação no desempenho bifásico da bomba.

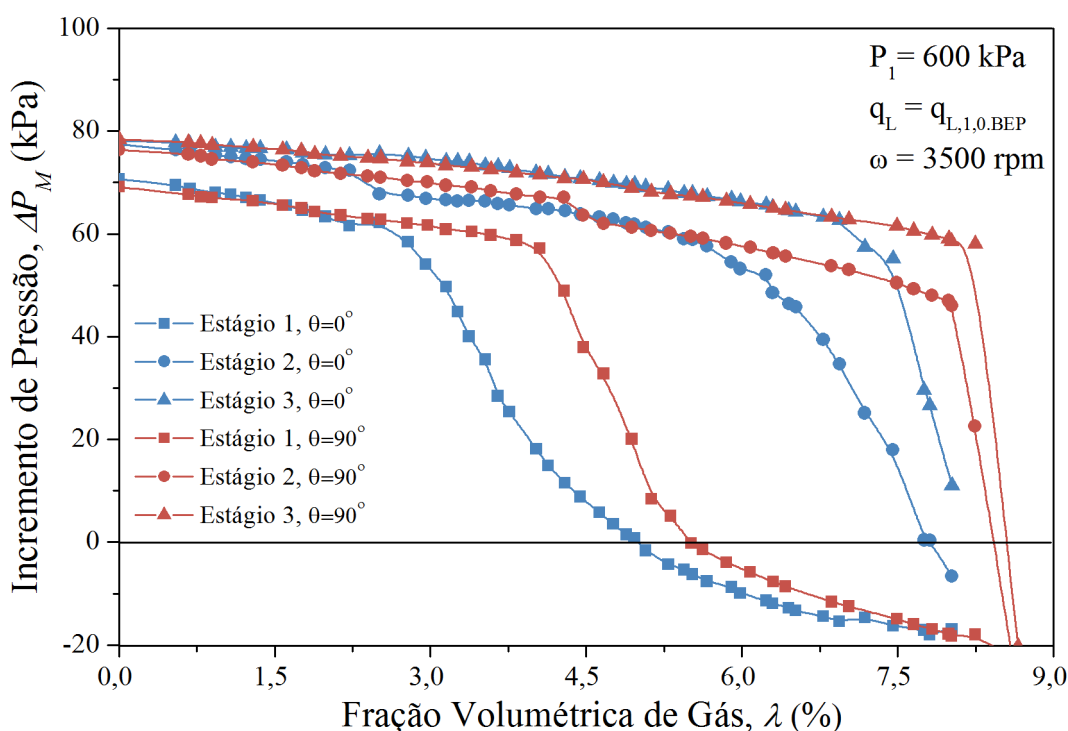


Figura 4.81 – Influência da inclinação no ganho de pressão por estágio, na rotação de 3500, pressão de sucção de 600 kPa e vazão do BEP.

Para a vazão de  $1,25 \cdot \text{BEP}$ , Figura 4.82, o aumento da inclinação possui uma influência considerável na fração de gás que caracteriza o ponto de *Surging* do primeiro estágio. Para  $\theta = 0^\circ$ , o ponto de *Surging* do primeiro estágio ocorre para  $\lambda \approx 2,5\%$ , enquanto que, para  $\theta = 90^\circ$ , esse valor aumenta para  $\lambda \approx 4\%$ . Em relação ao ponto de *Gas Locking*, a fração de gás passa de  $\lambda \approx 3,5\%$  para  $\lambda \approx 4,5\%$ , devido ao aumento da inclinação. No entanto, o desempenho do segundo e terceiro estágios sofrem uma influência bem menos significativa da inclinação.

O campo gravitacional não possui influência relevante no escoamento no interior dos canais do impelidor, conforme mostrado na visualização do escoamento apresentado no Capítulo 3. Para a rotação de 3500 rpm, o campo centrífugo é, aproximadamente, 680 vezes maior que o campo gravitacional.

No entanto, o campo gravitacional influencia a distribuição entre as fases na sucção da bomba.

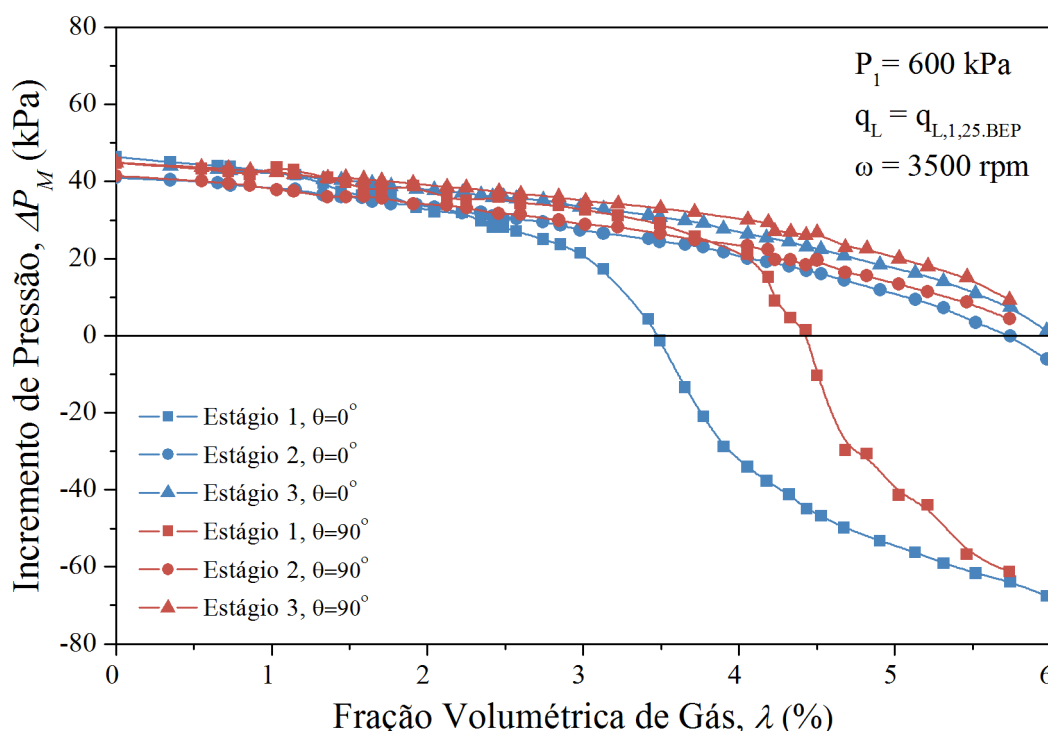


Figura 4.82 – Influência da inclinação no ganho de pressão por estágio, na rotação de 3500, pressão de sucção de 600 kPa e vazão do 1,25.BEP.

A visualização do escoamento na entrada da BCS para as inclinações horizontal e vertical é apresentada na Figura 4.83 e Figura 4.84, respectivamente. As visualizações referem-se à rotação de 3500 rpm, vazão do BEP, pressão de sucção de 600 kPa e fração volumétrica de gás de 3,7%.

Para a operação horizontal, Figura 4.83, a fase gás apresenta a tendência de se acumular na região superior do tubo de entrada. A força de empuxo atua nas bolhas de gás, fazendo com que apareça uma componente de velocidade transversal ao sentido do escoamento. Para a operação vertical da bomba, Figura 4.84, observa-se que a fase gasosa é uniformemente distribuída na seção transversal do tubo.

Portanto, o acúmulo das bolhas de gás no topo do tubo de sucção e a possível estratificação entre as fases, fornece indícios sobre a melhoria do desempenho bifásico da BCS em função do aumento da inclinação.

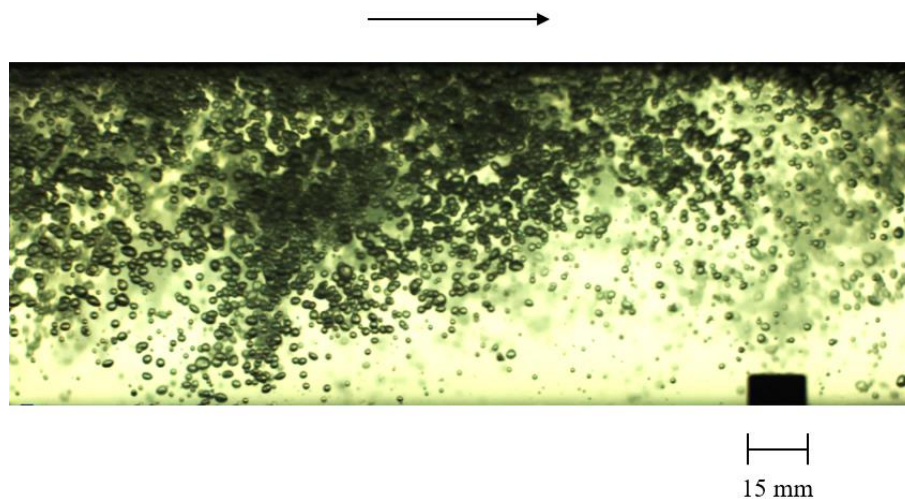


Figura 4.83 – Visualização do escoamento para a operação horizontal da BCS a 3500 rpm, vazão do BEP, pressão de sucção de 600 kPa e fração de gás de 3,7%.

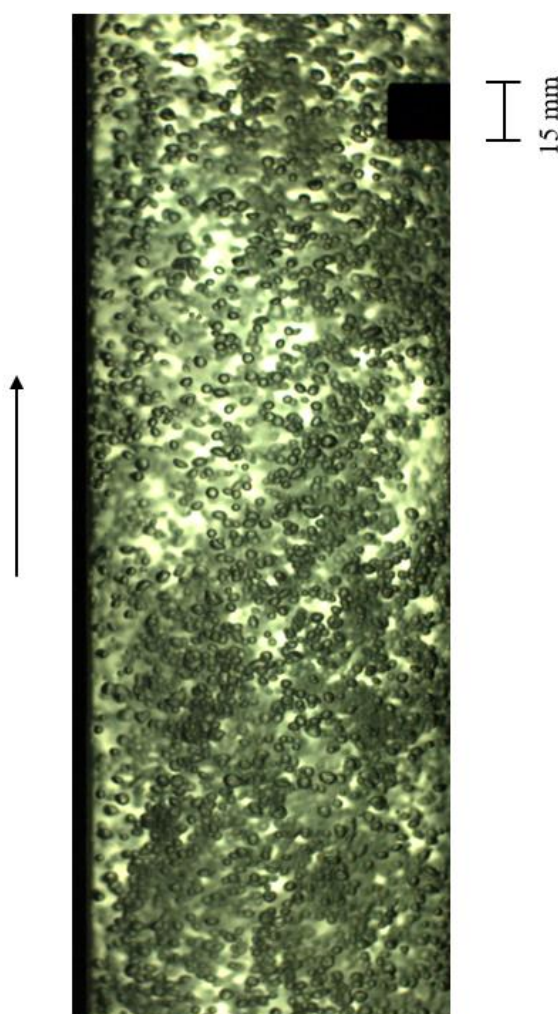


Figura 4.84 – Visualização do escoamento para a operação vertical da BCS a 3500 rpm, vazão do BEP, pressão de sucção de 600 kPa e fração de gás de 3,7%.



### 4.2.3 Testes Bifásico Fluido Viscoso-Ar

Nesta seção, são apresentados os resultados de desempenho da BCS GN5200 operando com escoamento bifásico de líquido viscoso e gás.

A análise dos efeitos da pressão de entrada, vazão de líquido e inclinação na operação da BCS com fluido viscoso e gás, apresentam as mesmas tendências já discutidas na seção anterior, por tanto, não serão repetidas nesta seção.

#### 4.2.3.1 Efeito da Viscosidade do Líquido

As comparações entre os desempenhos da BCS operando com mistura água-ar e fluido viscoso-ar, nas rotações de 2400 e 3500 rpm são apresentados na Figura 4.85 e Figura 4.86, respectivamente. Esses resultados foram obtidos para vazão de líquido do BEP e pressão de sucção de 600 kPa.

Essas comparações revelam que o aumento da viscosidade intensifica a degradação da capacidade da BCS de fornecer energia a mistura. Os efeitos combinados da viscosidade e da presença de uma fase compressiva promovem uma severa diminuição do incremento de pressão em função da fração de gás.

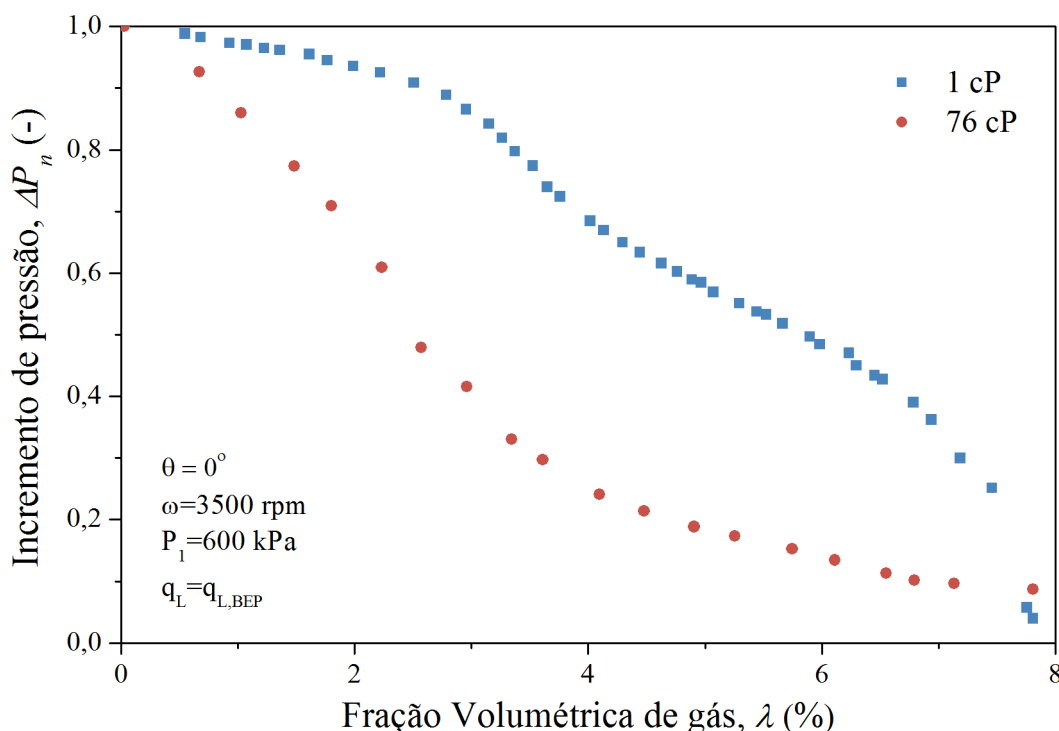


Figura 4.85 – Efeito da viscosidade no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e inclinação horizontal.

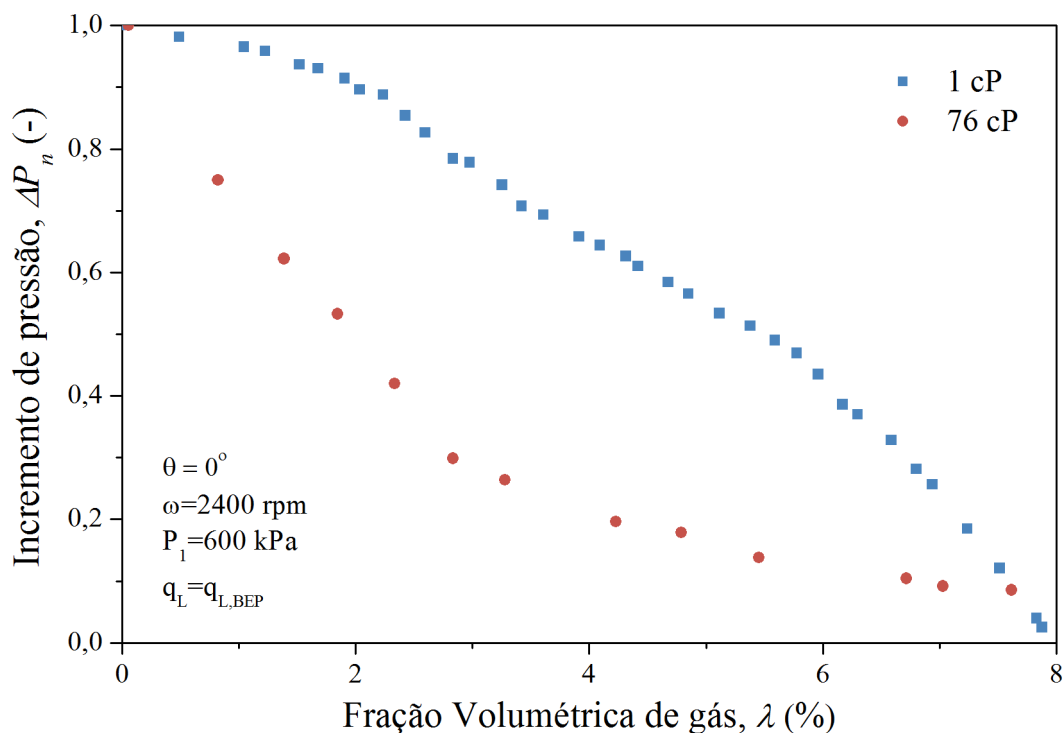


Figura 4.86 – Efeito da viscosidade no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na rotação de 2400 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e inclinação horizontal.

O ponto de *Surging*, também, é afetado pelo aumento viscosidade, fazendo com que a mudança no padrão de escoamento no interior do impelidor ocorra em menores frações de gás.

A viscosidade do líquido atua diretamente no coeficiente de arrasto sobre as bolhas de gás, aumentando a força de arrasto responsável por carregar as bolhas para fora do impelidor. No entanto, o aumento da força de arrasto não é suficiente para superar a degradação causada pelo aumento das dissipações viscosas. Conforme apresentado no Capítulo 3, o aumento da viscosidade do líquido faz com que as bolhas possuam um tamanho maior, facilitando sua coalescência.

#### 4.2.3.2 Efeito da Rotação

Em relação à rotação, os resultados bifásicos com a mistura fluido viscoso-ar revelam algumas diferenças quando comparados a mistura água-ar. Os efeitos da rotação no desempenho bifásico da BCS, para as vazões de 0,8.BEP, BEP e 1,2.BEP são apresentados na Figura 4.87, Figura 4.88 e Figura 4.89, respectivamente. Esses testes foram realizados com pressão de sucção de 600 kPa e viscosidade de 76 cP.

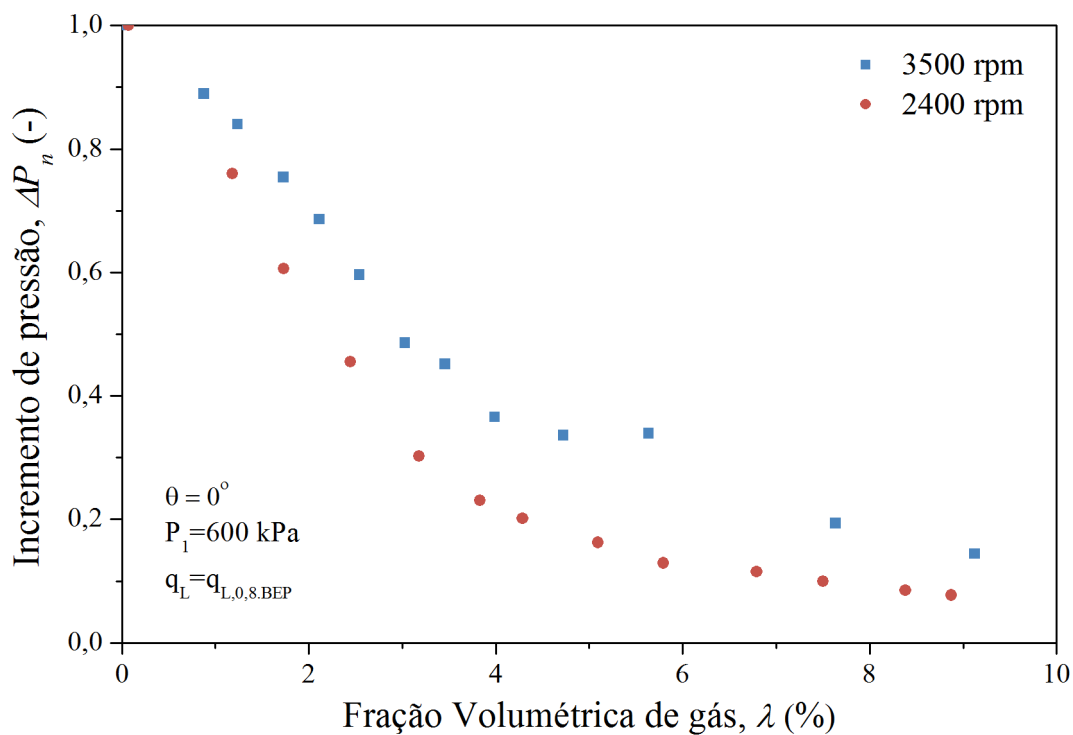


Figura 4.87 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na pressão de sucção de 600 kPa, viscosidade de 76 cP e vazão de 0,8.BEP.

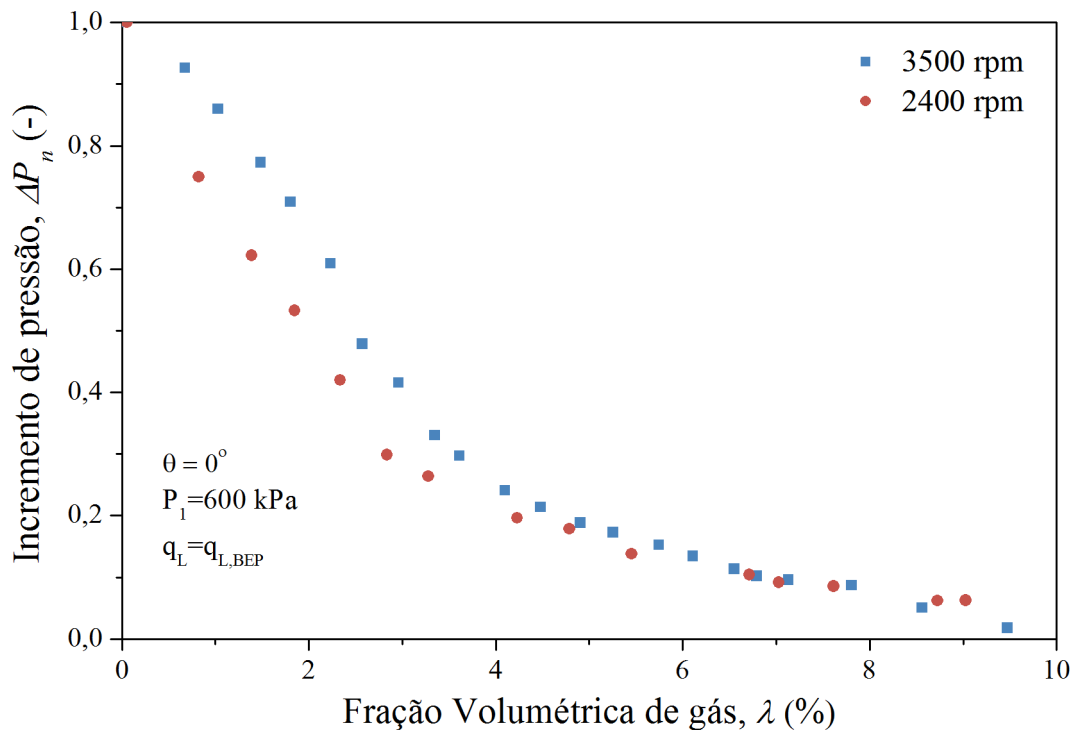


Figura 4.88 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na pressão de sucção de 600 kPa, 76 cP e vazão do BEP.

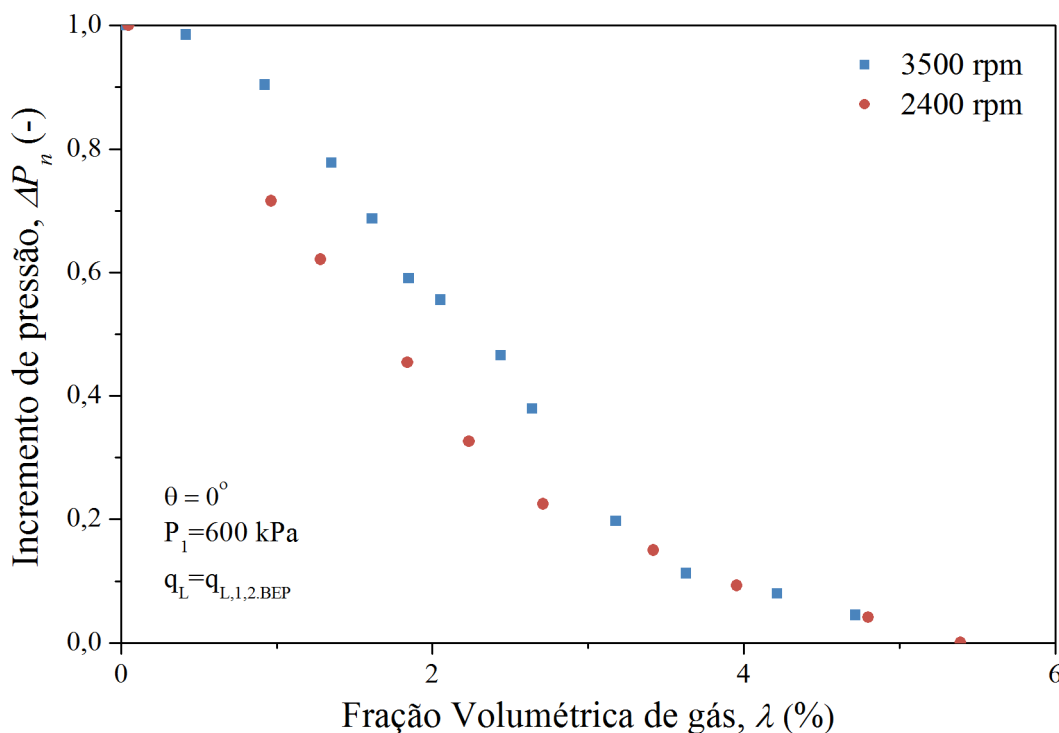


Figura 4.89 – Efeito da rotação no desempenho bifásico da BCS GN 5200 operando na pressão de sucção de 600 kPa, 76 cP e vazão de 1,2.BEP.

Diferentemente do observado para a mistura água-ar, esses resultados revelam uma influência mais significativa da rotação no desempenho bifásico da BCS. O aumento da rotação melhora o desempenho bifásico da bomba.

Essa melhora de desempenho pode ser explicada analisando a operação monofásico com fluido viscoso. Conforme apresentado na seção 4.2.1.2, a rotação influencia diretamente nos fatores de correção viscosos. O incremento da rotação promove o aumento dos fatores de correção, ou seja, ocorre uma diminuição dos efeitos dissipativos devido a viscosidade.

#### 4.2.3.3 Incremento de Pressão por Estágio

Os incrementos de pressão por estágio para a BCS GN5200 operando com fluido viscoso e ar, nas vazões de 0,8.BEP, BEP e 1,2BEP são apresentados na Figura 4.90, Figura 4.91 e Figura 4.92, respectivamente. Esses testes foram realizados com pressão de sucção de 600 kPa, inclinação de 0° e rotação de 3500 rpm.

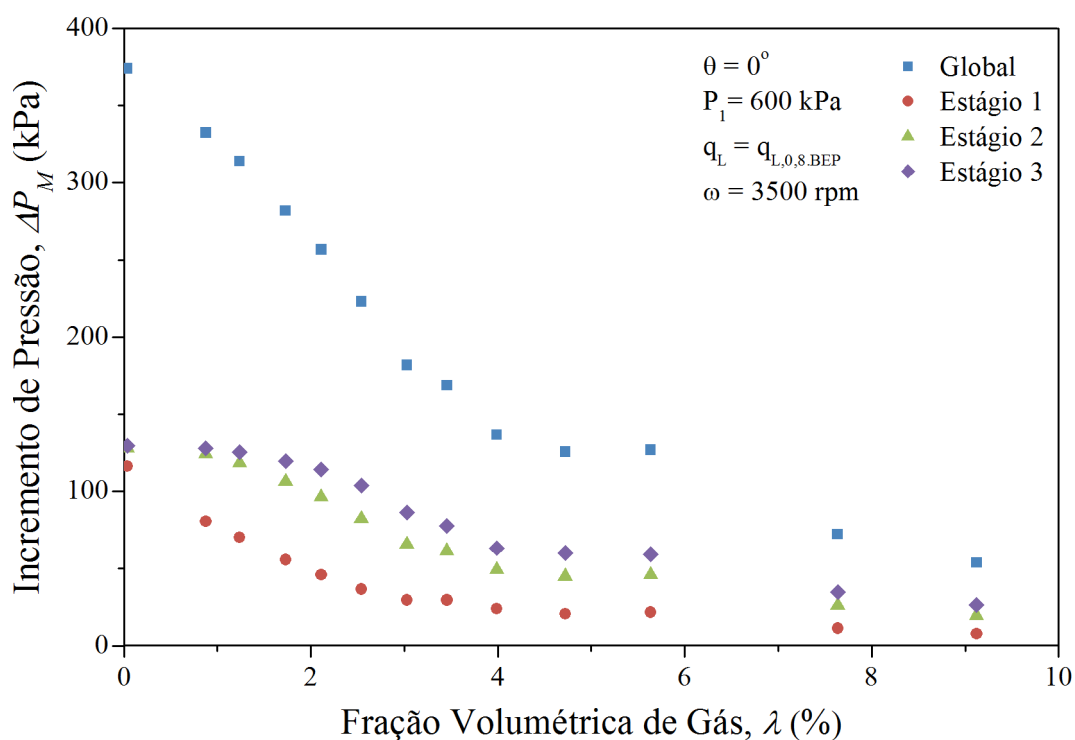


Figura 4.90 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 0,8.BEP e viscosidade de 76 cP.

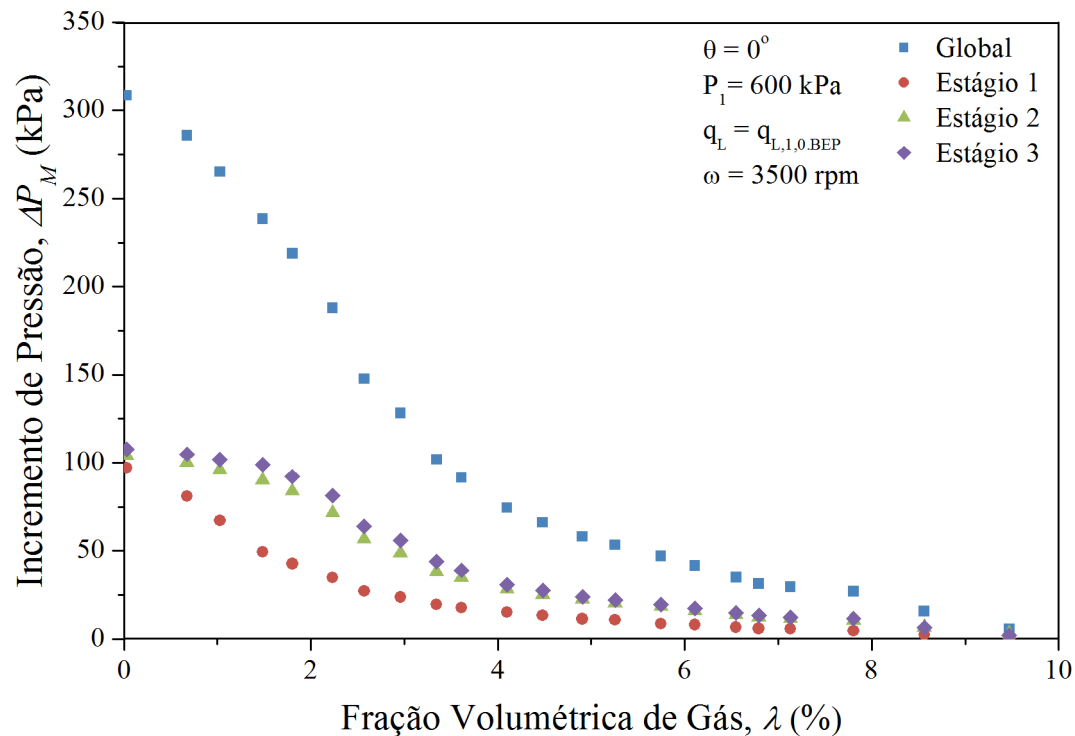


Figura 4.91 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de BEP e viscosidade de 76 cP.

Esses resultados revelam a tendência do primeiro estágio sofrer uma severa degradação de desempenho devido aos efeitos combinados da viscosidade e presença de gás. A curva de desempenho apresenta um comportamento decrescente bastante acentuado desde as frações de gás próximo de zero, dificultando a identificação do ponto de *Surging*. No entanto, diferentemente da operação com a mistura água-ar, o primeiro estágio não apresenta regiões de ganho de pressão negativo em nenhuma das condições operacionais testadas.

O segundo e terceiro estágios apresentam desempenho semelhantes, sendo o desempenho do terceiro estágio ligeiramente superior.

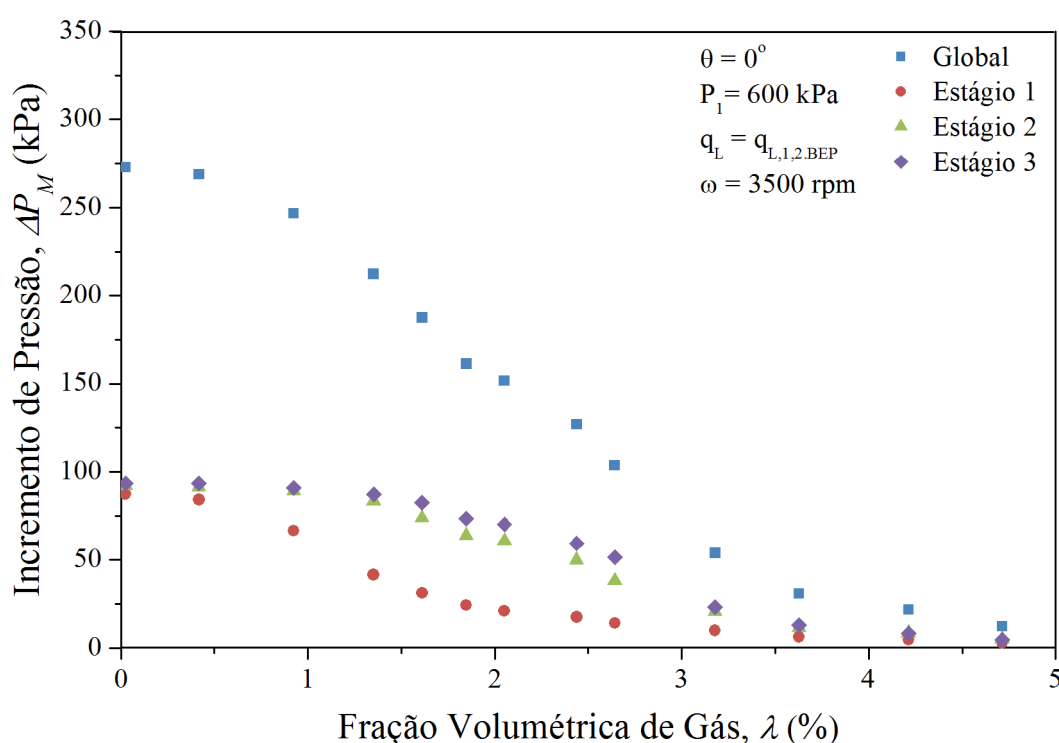


Figura 4.92 – Incremento de pressão por estágio da BCS GN5200, rotação de 3500 rpm, pressão de sucção de 600 kPa e vazão de líquido de 1,2.BEP e viscosidade de 76 cP.

## 5 MODELAGEM DO ESCOAMENTO

Neste capítulo é apresentada a extensão do modelo de desempenho de BCSs proposto por Biazussi (2014). A extensão dessa modelagem consiste em considerar as dissipações de energia devido a viscosidade do fluido.

O capítulo é dividido em duas seções. Inicialmente, é apresentado o modelo de desempenho monofásico e bifásico. Na segunda seção, são apresentados os resultados obtidos por meio do modelo proposto.

### 5.1 Fundamentação Teórica

#### 5.1.1 Análise do Ganho de Pressão Monofásico

A abordagem utilizada por Biazussi (2014) é semelhante à proposta por Gülich (1999). O ganho de pressão fornecido ao fluido é calculado com base no ganho de pressão idealizado pela Equação de Euler. Algumas idealizações assumidas nessa formulação são corrigidas considerando-se um termo dissipativo. Isto é:

$$\Delta P = \Delta P_{Euler} - \Delta P_{dissipações} \quad (5.1)$$

onde  $\Delta P$  é o ganho de pressão real fornecido ao fluido,  $\Delta P_{Euler}$  é o ganho de pressão idealizado e  $\Delta P_{dissipações}$  representam as dissipações de energia que afastam o desempenho real do idealizado.

Conforme apresentado na Equação (2.29), o ganho de pressão de Euler é dado por:

$$\Delta P_{Euler} = \rho \omega^2 r_2^2 \left( 1 - \frac{q \cot \beta_2}{2\pi b_2 \omega r_2^2} \right) = \frac{1}{4} \rho \omega^2 D^2 - k_1^* \left( \frac{L_i}{D} \right) \frac{\rho \omega q}{D} \quad (5.2)$$

sendo que:

$$k_1^* \left( \frac{L_i}{D} \right) = \frac{D \cot \beta_2}{2\pi b_2} = k_1 \quad (5.3)$$

onde  $k_1$  é uma constante que depende unicamente de parâmetros geométricos do impelidor da bomba.

As perdas dissipativas são caracterizadas pela soma das perdas por atrito, perdas por turbilhonamento e perdas localizadas. Assim:

$$\Delta P_{perdas} = \Delta P_{atrito} + \Delta P_{turbilhonamento} + \Delta P_{localizada} \quad (5.4)$$

A perda por atrito deve-se a fricção do fluido com as paredes dos canais do impelidor e estator. Essa perda pode ser expressa por meio de um fator de atrito, que é composto por um termo turbulento e um termo viscoso. Isto é:

$$\begin{aligned} \Delta P_{atrito} &= f \left( Re, \frac{\epsilon}{D} \right) \frac{L_i}{D} \frac{\rho}{2} \left( \frac{q}{A_n} \right)^2 = k_a \left( \frac{L_i}{D} \right) f \left( Re, \frac{\epsilon}{D} \right) \rho \omega^2 D^2 \left( \frac{q}{\omega D^3} \right)^2 \\ f \left( Re, \frac{\epsilon}{D} \right) &= k_2^* \left( \frac{L_i}{D} \right) \frac{\mu D}{\rho q} + k_3^* \left( \frac{L_i}{D} \right) \left( \frac{\mu D}{\rho q} \right)^n \end{aligned} \quad (5.5)$$

onde  $A_n = 2\pi \bar{r} \bar{b}$ ,  $k_2 = k_a k_2^*$  e  $k_3 = k_a k_3^*$ .

Portanto, a dissipação devido ao atrito é dada por:

$$\Delta P_{atrito} = \left[ k_2 \left( \frac{L_i}{D} \right) \frac{\mu D}{\rho q} + k_3 \left( \frac{L_i}{D} \right) \left( \frac{\mu D}{\rho q} \right)^n \right] \rho \omega^2 D^2 \left( \frac{q}{\omega D^3} \right)^2 \quad (5.6)$$

onde  $n$  expressa o efeito viscoso em elevadas vazões e assume valores menor que um.

A perda por turbilhonamento é composta por dissipações de energia de três origens distintas: perda por recirculação, perda por escoamentos secundários e perda por choque.

As perdas por recirculação são inversamente proporcionais a vazão, sendo máximas para a vazão zero. As recirculações são induzidas pelo movimento de rotação do impelidor, causando vorticidade do fluido nas arestas de entrada e saída, conforme mostrado na Figura 5.1.

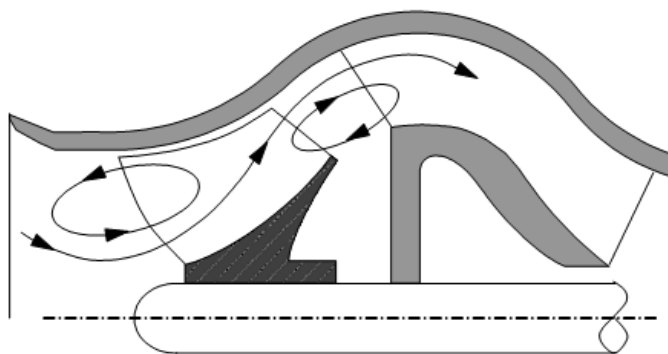


Figura 5.1 – Recirculações provocadas pela rotação do impelidor (Gülich, 2008).



A perda por escoamento secundário é causada pela distorção do perfil de velocidades no interior dos canais do impelidor. A aceleração de Coriolis desvia o fluido em direção da superfície de pressão da pá, criando o escoamento secundário. O número de Rossby é utilizado para descrever o escoamento secundário e o perfil de velocidades no interior dos canais do impelidor. Esse adimensional é definido como sendo a razão entre a aceleração centrípeta e a aceleração de Coriolis. As perdas devido ao escoamento secundário são relevantes para vazões menores que o BEP e são proporcionais ao número de Rossby, tal que:

$$R_o = \frac{|\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})|}{2|\vec{\omega} \times \vec{v}|} = \frac{\frac{D}{2} \omega^2}{2\omega \left(\frac{q}{A}\right)} = k_r \left(\frac{L_i}{D}\right) \frac{\omega D^3}{q} \quad (5.7)$$

As perdas por choques são causadas devido a mudanças abruptas na direção das linhas de corrente do escoamento. Conforme mostrado na Figura 5.2, para vazões menores que o BEP, a incidência do escoamento sobre o impelidor gera uma zona de separação na região de sucção da pá. A separação do escoamento nessa região não afeta significativamente o escoamento do fluido pelo canal formado por duas pás consecutivas. Para vazões maiores que o BEP, a zona de separação restringe a área disponível ao escoamento. O fluido é acelerado, reduzindo a pressão. Após a passagem dessa zona, o escoamento sofre uma expansão maior que o simples aumento da área entre as pás, aumentando as perdas e criando um efeito semelhante ao escoamento de um difusor.

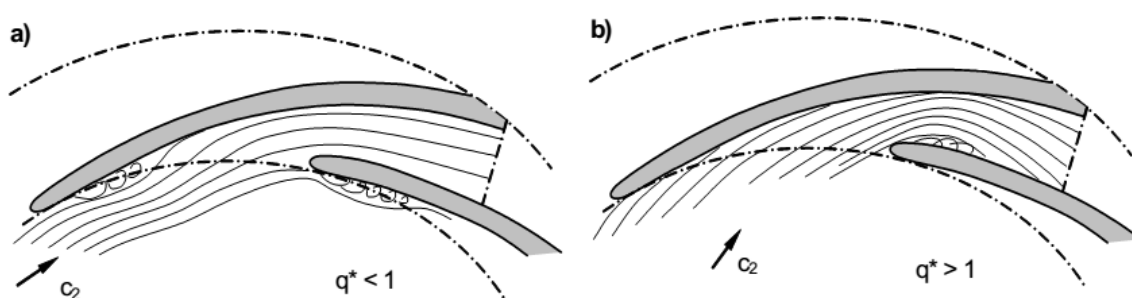


Figura 5.2 – Perdas por recirculação para (a) vazões menores que o BEP e (b) vazões maiores que BEP (Gulich, 2008).

A perda por choque pode ser calculada como:

$$\Delta P_{Choque} = k_4 \rho \omega^2 D^2 \left(\frac{L_i}{D}\right) \left[1 - k_5^* \left(\frac{L_i}{D}\right) \frac{q}{\omega D^3}\right]^2 \quad (5.8)$$

sendo que constante  $k_5^*$  é função geometria do impelidor:

$$k_5^* \left( \frac{L_i}{D} \right) = \frac{D^3 \cotg \beta_1}{2\pi b_1 r_1^2} \quad (5.9)$$

Para a vazão do BEP,  $q = q_{BEP} = 2\pi b_1 \omega r_1^2 \tg \beta_1$ , a perda por choque é nula.

Para um modelo unidimensional os efeitos das perdas de recirculação, escoamento secundário e choques se sobrepõem, tornando difícil a diferenciação dos mesmos. É proposto nesse trabalho agrupar essas três perdas em uma perda por “turbilhonamento”, que as engloba em um termo semelhante à perda por choque, porém sem a definição explícita do termo  $k_5^*$ . A perda por turbilhonamento é definida como:

$$\Delta P_{turbilhonamento} = k_4 \rho \omega^2 D^2 \left( \frac{L_i}{D} \right) \left[ 1 - k_5 \left( \frac{L_i}{D} \right) \frac{q}{\omega D^3} \right]^2 \quad (5.10)$$

As perdas localizadas referem-se as perdas de energia devido as singularidades impostas aos fluidos nas regiões de entrada do impelidor e do estator. Essa perda por ser calculada por:

$$\Delta P_{Localizadas} = k_6 \left( \frac{L_i}{D} \right) \rho \omega^2 D^2 \left( \frac{q}{\omega D^3} \right)^2 \quad (5.11)$$

Substituindo as Equações (5.2), (5.4), (5.10), (5.11) na Equação (5.1), tem-se:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Total} = & \frac{1}{4} D^2 \rho \omega^2 - k_1 \frac{q \rho \omega}{D} - \frac{q^2 \rho \left[ k_2 \frac{D\mu}{q\rho} + k_3 \left( \frac{D\mu}{q\rho} \right)^n \right]}{D^4} \\ & - k_4 D^2 \rho \omega^2 \left( 1 - k_5 \frac{q}{D^3 \omega} \right)^2 - k_6 \frac{\rho q^2}{D^4} \end{aligned} \quad (5.12)$$

A Equação (5.12) pode ser escrita em função dos adimensionais de vazão, elevação e do inverso do Reynolds rotacional, tal que:

$$\Psi = \frac{1}{4} - k_4 + (-k_1 - k_2 X + 2k_4 k_5) \Phi + \left[ -k_3 \left( \frac{X}{\Phi} \right)^n - k_4 k_5^2 - k_6 \right] \Phi^2 \quad (5.13)$$

Assim, a obtenção da curva de desempenho elevação *versus* vazão, adimensionais, requer a definição de uma constante geométrica adimensional  $k_1$  e do ajuste de cinco parâmetros adimensionais  $k_2, k_3, k_4, k_5$  e  $n$ .

### 5.1.2 Análise da Potência de Acionamento Monofásica

A potência consumida pela bomba pode ser interpretada como sendo a soma da potência hidráulica fornecida ao fluido e a potência dissipada durante a conversão de energia. A potência hidráulica fornecida ao fluido é calculada considerando-se a teoria de Euler de turbomáquinas. Assim:

$$BHP_{Eixo} = BHP_{Euler} + BHP_{perdas} \quad (5.14)$$

A potência dissipada envolve as perdas mecânicas nos mancais ou rolamentos, as perdas devido ao atrito de disco e as perdas por arrasto nas arestas das pás do impelidor.

$$BHP_{perdas} = BHP_{mecânicas} + BHP_{Disco} + BHP_{arrasto} \quad (5.15)$$

A potência hidráulica transferida ao fluido, conforme a teoria de Euler é definida como:

$$BHP_{Euler} = \Delta P_{Euler} q = \left[ \frac{1}{4} \rho \omega^2 D^2 - k_1 \frac{\rho \omega q}{D} \right] q \quad (5.16)$$

A potência mecânica dissipada durante o acionamento está relacionada às forças axiais que devem ser suportadas pelos mancais. A formulação sugerida por Biazussi (2014), é:

$$BHP_{mecânicas} = k_7 D^3 \Delta P \omega \quad (5.17)$$

onde  $\Delta P$  é o ganho de pressão fornecido pela bomba, conforme Equação (5.13).

A perda devido ao atrito de disco, provocada pelo movimento de rotação do impelidor imerso no fluido, é calculada considerando um termo viscoso e um inercial. Conforme proposto por Gülich (2008), tem-se:

$$BHP_{disco} = k_8 \mu \omega^2 D^3 + k_9 \rho \omega^3 D^5 \quad (5.18)$$

As perdas hidráulicas devido ao arrasto nas arestas de saída do impelidor são associadas a elevada velocidade tangencial do fluido. A dissipação de energia deve-se ao contato do fluido com a carcaça da bomba e, também, devido a intermitência do alinhamento das lâminas da saída do impelidor com a entrada do estator. A componente tangencial do fluido na aresta de saída do impelidor, é dada por:

$$V_{t2} = \omega r_2 - \frac{q \cot \beta_2}{2\pi r_2 b_2} = \omega D \left( \frac{1}{2} - k_1 \frac{2q}{\omega D^3} \right) \quad (5.19)$$

A potência consumida pelo arrasto na aresta de saída do impelidor, pode ser calculada considerando-se um termo inercial e um termo viscoso. Assim:

$$\begin{aligned} BHP_{arrasto} &= k'_{10} \mu \frac{V_{t2}^2}{D} A_{n2} + k'_{11} \rho V_{t2}^3 A_{n2} = k'_{10} \rho V_{t2}^2 A_{n2} \left( \frac{\mu}{\rho D} + \frac{k'_{11}}{k'_{10}} V_{t2} \right) \\ &= k'_{10} 2\pi r_2 b_2 \rho \omega^2 D^2 \left( \frac{1}{2} - k_1 \frac{2q}{\omega D^3} \right)^2 \left[ \frac{\mu}{\rho D} + \frac{k'_{11}}{k'_{10}} \omega D \left( \frac{1}{2} - k_1 \frac{2q}{\omega D^3} \right) \right] \\ &= k_{10} \rho \omega^3 D^5 \left( \frac{1}{2} - k_1 \frac{2q}{\omega D^3} \right)^2 \left[ \frac{\mu}{\rho \omega D^2} + k_{11} \left( \frac{1}{2} - k_1 \frac{2q}{\omega D} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.20)$$

onde  $A_{n2}$  representa a área normal ao escoamento na aresta de saída do impelidor.

Substituindo as Equações (5.15), (5.16), (5.17), (5.18), (5.20) na Equação (5.14), tem-se:

$$\begin{aligned} BHP_{eixo} &= q \left( \frac{1}{4} D^2 \rho \omega^2 - k_1 \frac{q \rho \omega}{D} \right) + k_7 D^3 \Delta P \omega + k_8 D^3 \mu \omega^2 + k_9 D^5 \rho \omega^3 \\ &\quad + D^5 \rho \omega^3 \left( \frac{1}{2} - k_1 \frac{2q}{D^3 \omega} \right)^2 k_{10} \left[ \frac{\mu}{D^2 \rho \omega} + \left( \frac{1}{2} - k_1 \frac{2q}{D^3 \omega} \right) k_{11} \right] \end{aligned} \quad (5.21)$$

Dividindo a Equação (5.21) por  $\rho \omega^3 D^5$  e introduzindo os coeficientes de potência, elevação, vazão e o número de Reynolds rotacional, tem-se:

$$\begin{aligned} \Pi &= k_7 \Psi + k_9 + X \left( k_8 + \frac{k_{10}}{4} \right) + \frac{k_{10} k_{11}}{8} - k_1^3 k_{10} k_{11} 8 \Phi^3 \\ &\quad + \Phi \left( \frac{1}{4} - 2k_1 k_{10} X - \frac{3}{2} k_1 k_{10} k_{11} \right) \\ &\quad + \Phi^2 (-k_1 + 4k_1^2 k_{10} X + 6k_1^2 k_{10} k_{11}) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Agrupando as constantes geométricas, a Equação (5.22) pode ser escrita com:

$$\Pi = z_0 \Psi + z_1 + z_2 X + \Phi(z_3 - z_4 X) + \Phi^2(z_6 X + z_5) - z_7 \Phi^3 \quad (5.23)$$

sendo que:

$$z_1 = k_9 + \frac{k_{10} k_{11}}{8} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned}
z_2 &= k_8 + \frac{k_{10}}{4} \\
z_3 &= \frac{1}{4} - \frac{3}{2}k_1k_{10}k_{11} \\
z_4 &= 2k_1k_{10} \\
z_5 &= 6k_1^2k_{10}k_{11} - k_1 \\
z_6 &= 4k_1^2k_{10} \\
z_7 &= 8k_1^3k_{10}k_{11}
\end{aligned}$$

Portanto, o cálculo da potência consumida depende, inicialmente, da solução Equação (5.13) e do ajuste de sete coeficientes adimensionais que dependem da geometria da bomba.

### 5.1.3 Operação de BCSs com Fluidos de Baixa Viscosidade

Na operação de bombas com água, ou com fluidos de viscosidades próximas a da água, o parâmetro viscoso  $X$  pode ser desconsiderado. Assim, tem-se que  $\Psi = \Psi(\Phi)$  e a Equação (5.13) pode ser escrita como:

$$\Psi = \frac{1}{4} - k_4 + (-k_1 + 2k_4k_5)\Phi + (-k_4k_5^2 - k_6)\Phi^2 \quad (5.25)$$

A potência consumida no acionamento pode ser simplificada como:

$$\Pi = z_0\Psi + z_1 + z_3\Phi + z_5\Phi^2 - z_7\Phi^3 \quad (5.26)$$

### 5.1.4 Operação com Mistura Bifásica Gás-Líquido

Para a operação de BCSs com escoamento bifásico gás-líquido, é realizada a extensão dos modelos propostos nas Equações (5.13) e (5.23). Para isso, é necessário definir coeficientes adimensionais de vazão e elevação para a mistura gás-líquido.

- Coeficiente de vazão de mistura ( $\Phi_M$ ):

$$\Phi_M = \frac{q_L + q_G}{\omega D^3} \quad (5.27)$$

- Coeficiente de elevação de mistura ( $\Psi_M$ ):

$$\Psi_M = \frac{\Delta P_M}{\rho_M \omega^2 D^2} \quad (5.28)$$

sendo a massa específica da mistura  $\rho_M$  dada por:

$$\rho_M = \rho_G \alpha_G + \rho_L (1 - \alpha_G) \quad (5.29)$$

Considerando o modelo de deslizamento, tem-se:

$$\frac{V_{SG}}{\alpha_G} = C_0 V_M - V_{DG} \quad (5.30)$$

A Equação (5.30) pode ser escrita como:

$$\alpha_G = \frac{V_{SG}}{C_0 V_M - V_{DG}} = \frac{q_G}{c_0 (q_L + q_G) - V_{DG} A} \quad (5.31)$$

onde  $A$  é uma área de referência.

Escrevendo a fração de vazio de gás  $\alpha_G$  em função das condições de entrada da bomba, tem-se:

$$\alpha_G = \frac{q_{G,i} \frac{P_i}{P}}{c_0 \left( q_L + q_{G,i} \frac{P_i}{P} \right) - q_\infty} \quad (5.32)$$

onde o subíndice  $i$  refere-se à condição de entrada da bomba e  $q_\infty = V_{DG} A$ .

Para o escoamento de líquidos pouco viscosos em tubos, é usual assumir-se  $C_o = 1,2$ . Para escoamentos descendentes em tubos, em que a força de empuxo é oposta a força de campo, situação semelhante ao escoamento no rotor da bomba, é possível encontrar  $C_o < 1$ . Porém, isto é incerto em se tratando de geometrias complexas girantes, tais como canais de rotores, onde presença de forças transversais à direção do escoamento pode ter um significativo efeito sobre  $C_o$ .

A Equação (5.32) por isso é válida para:

$$q_L > \frac{q_\infty}{C_o} - q_{Gi} \frac{P_i}{P} \quad (5.33)$$

Assumindo-se comportamento de gás ideal, escoamento isotérmico e substituindo a Equação (5.32) na Equação (5.29), tem-se:

$$\rho(\alpha) = \rho_L \left[ 1 - \frac{\frac{\dot{m}_g RT}{P}}{C_o \left( q_L + \frac{\dot{m}_g RT}{P} \right) - q_\infty} \left( 1 - \frac{P}{\rho_L RT} \right) \right] \quad (5.34)$$

onde  $R$  é a constante do gás.

Considerando a variação de  $q_\infty$  conforme o padrão de escoamento e a dificuldade em estabelecer as transições entre esses padrões, essa abordagem assume valores únicos de  $C_o$  e  $q_\infty$  capazes de representar o comportamento completo das curvas, em determinada rotação.

A vazão  $q_\infty$  pode ser escrita como:

$$q_\infty = V_{DG} A = V_{DG} \pi D b_2 \quad (5.35)$$

onde  $A$  é a área na aresta de saída do impelidor.

Para o padrão bolhas, a velocidade de deslizamento do gás  $V_{DG,b}$  pode ser expressa por:

$$V_{DG,b} = k_{b,\infty} \left[ \frac{\sigma \frac{D}{2} \omega^2 \left( 1 - \frac{P_i}{\rho_L RT} \right)}{\rho_L} \right]^{1/4} \quad (5.36)$$

Substituindo a Equação (5.36) na (5.35), tem-se:

$$q_\infty = k_b D b_2 \left[ \frac{\sigma D \omega^2 \left( 1 - \frac{P_i}{\rho_L RT} \right)}{\rho_L} \right]^{1/4} \quad (5.37)$$

sendo:

$$k_b = k_{b,\infty} \pi \left( \frac{1}{2} \right)^{1/4} \quad (5.38)$$

### 5.1.5 Análise do Ganho de Pressão Bifásico

A pressão total gerada por uma bomba de  $n$  estágios, pode ser calculada por:

$$\Delta P_M^{stg} = \frac{dP}{dn} \quad (5.39)$$

onde  $\Delta P_M^{stg}$  é a pressão gerada por cada estágio da bomba.

Aplicando as Equações (5.27) a (5.39) na Equação (5.13), o desempenho da BCS operando com escoamento bifásico gás-líquido viscoso, pode ser calculado por:

$$\int_e^s \frac{dP}{P_{BCS}} = \rho_L D^2 \omega^2 n \quad (5.40)$$

sendo:

$$P_{BCS} = \left\{ \frac{1}{4} - k_4 - \frac{(k_1 - 2k_4k_5)(q_L P + T\dot{m}_G R)}{D^3 P \omega} - \frac{Xk_2 \left( q_L + \frac{T\dot{m}_G R}{P} \right)}{D^3 \omega} \right. \\ \left. - \frac{(\rho_L P + T\dot{m}_G R)^2 \left[ k_4 k_5^2 + k_6 + k_3 \left( \frac{D^3 P X \omega}{\rho_L P + T\dot{m}_G R} \right)^n \right]}{D^6 P^2 \omega^2} \right\} \quad (5.41)$$

$$\left\{ 1 + \frac{\dot{m}_G (P - TR\rho_L)}{\rho_L \left( C_0 (q_L P + T\dot{m}_G R) - DPk_b b_2 \left[ \frac{D\sigma\omega^2 \left( \rho_L - \frac{P_i}{TR} \right)}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \right)} \right\}$$

A integral da Equação (5.40) pode ser efetuada numericamente, permitindo descrever a pressão de saída ( $P_s$ ) em função da pressão de entrada ( $P_e$ ), vazão de líquido, vazão mássica de gás, rotação, diâmetro, número de estágios e propriedades dos fluidos.

As constantes  $k_2, k_3, k_4, k_5$  e  $n$  são as mesmas obtidas para o escoamento monofásico. Portanto, por meio dos dados experimentais bifásicos são ajustadas as constantes  $C_0$  e  $k_b$ .

### 5.1.6 Análise da Potência Consumida Bifásica

Para o cálculo da potência consumida pela bomba no escoamento bifásico é definido um o coeficiente de potência de mistura  $\Pi_M$ , isto é:



$$\Pi_M = \frac{BHP_M}{\rho_M \omega^3 D^5} \quad (5.42)$$

onde  $BHP_M$  é a potência consumida pela bomba na operação com a mistura bifásica.

Reescrevendo a Equação (5.23) utilizando as definições dadas pelas Equações (5.27), (5.28), (5.34), (5.37) e (5.42), a potência consumida pela BCS operando com escoamento bifásico viscoso é dada por:

$$\begin{aligned} BHP_M &= nD^5\omega^3\rho_L \left\{ 1 + \frac{\dot{m}_G(P - TR\rho_L)}{\rho_L \left( C_0(q_L P + T\dot{m}_G R) - DPk_b b_2 \left[ \frac{D\sigma\omega^2 \left( \rho_L - \frac{P_i}{TR} \right)}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \right)} \right\} \cdot \left\{ z_1 + Xz_2 \right. \\ &+ \frac{(z_3 - Xz_4) \left( q_L + \frac{T\dot{m}_G R}{P} \right)}{D^3\omega} + \frac{(z_5 - Xz_6) \left( q_L + \frac{T\dot{m}_G R}{P} \right)^2}{D^3\omega} - z_7 \left( q_L + \frac{T\dot{m}_G R}{P} \right) \\ &\left. + \frac{(P - P_i)z_0}{D^2\omega^2\rho_L \left( 1 + \frac{\dot{m}_G(P - TR\rho_L)}{\rho_L \left( C_0(q_L P + T\dot{m}_G R) - DPk_b b_2 \left[ \frac{D\sigma\omega^2 \left( \rho_L - \frac{P_i}{TR} \right)}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \right)} \right)} \right\} \quad (5.43) \end{aligned}$$

A Equação (5.43) pode ser calculada diretamente e representa a potência consumida pela bomba operando com misturas bifásicas viscosas.

A abordagem simplificada apresentada anteriormente tem como objetivo representar o ganho de pressão e a potência de eixo da bomba. A abordagem idealizada unidimensional necessita de dados experimentais monofásicos para ajuste das constantes

geométricas e dados experimentais bifásicos para o ajuste das constantes do modelo de deslizamento.

## 5.2 Resultados do Modelo

Nesta seção são apresentados os resultados do modelo de desempenho de BCS proposto inicialmente por Biazussi (2014) e estendido para fluidos viscosos. Primeiramente, são apresentados os resultados de desempenho monofásico e na sequência são apresentados os resultados obtidos para o escoamento bifásico gás-líquido.

### 5.2.1 Escoamento Monofásico de Água

A obtenção das constantes do modelo (5.13) foi realizado utilizando-se o software *Wolfram Mathematica*®, versão 9.0, em que a função *FindFit* calcula o ajuste da equação com a finalidade de minimizar a norma do erro, calculado por:

$$Norma = \sqrt{Abs(x)^2 + Abs(y)^2 + Abs(z)^2 \dots + Abs(n)^2} \quad (5.44)$$

onde  $n$  é o número de amostras do dado de entrada e as variáveis  $x, y, z$  representam o desvio entre o valor medido e o valor calculado.

Para a operação da BCS GN5200 com escoamento monofásico de água, os termos viscosos podem ser desconsiderados e o ajuste da Equação (5.25) fornece as constantes  $k_4$ ,  $k_5$  e  $k_6$ . A constante geométrica  $k_1$ , definida pela Equação (5.3), é calculada com base na geometria apresentada na Tabela 4.2.

O ajuste das constantes foi realizado utilizando-se os dados de desempenho monofásico com água nas rotações de 1800, 2400, 3000 e 3500 rpm. Os valores cálculos para as constantes são apresentados na Tabela 5.1, sendo a norma do ajuste igual a 0,02486.

As comparações entre os dados de desempenho experimentais e os obtidos por meio do modelo ajustado são apresentadas na Figura 5.3 e Figura 5.4.

Tabela 5.1 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica com água.

$k_1$	$k_4$	$k_5$	$k_6$
1,37706	0,19281	0,52120	110,36642

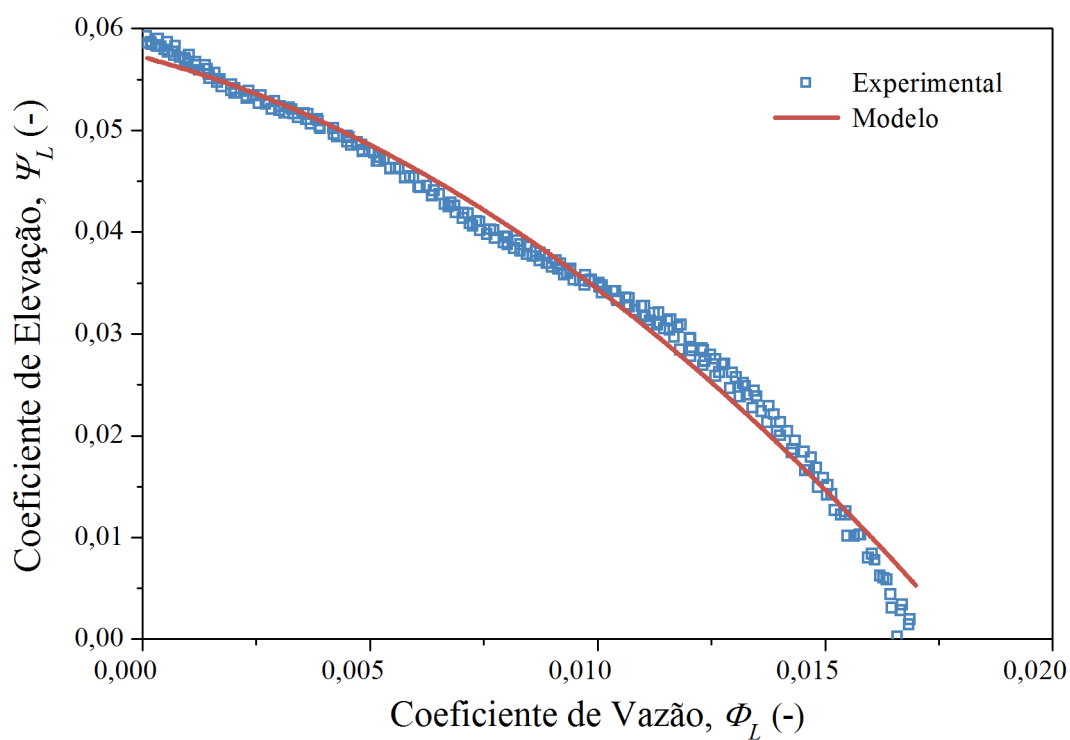


Figura 5.3 – Ajuste das constantes do modelo para a elevação na operação monofásica com água.

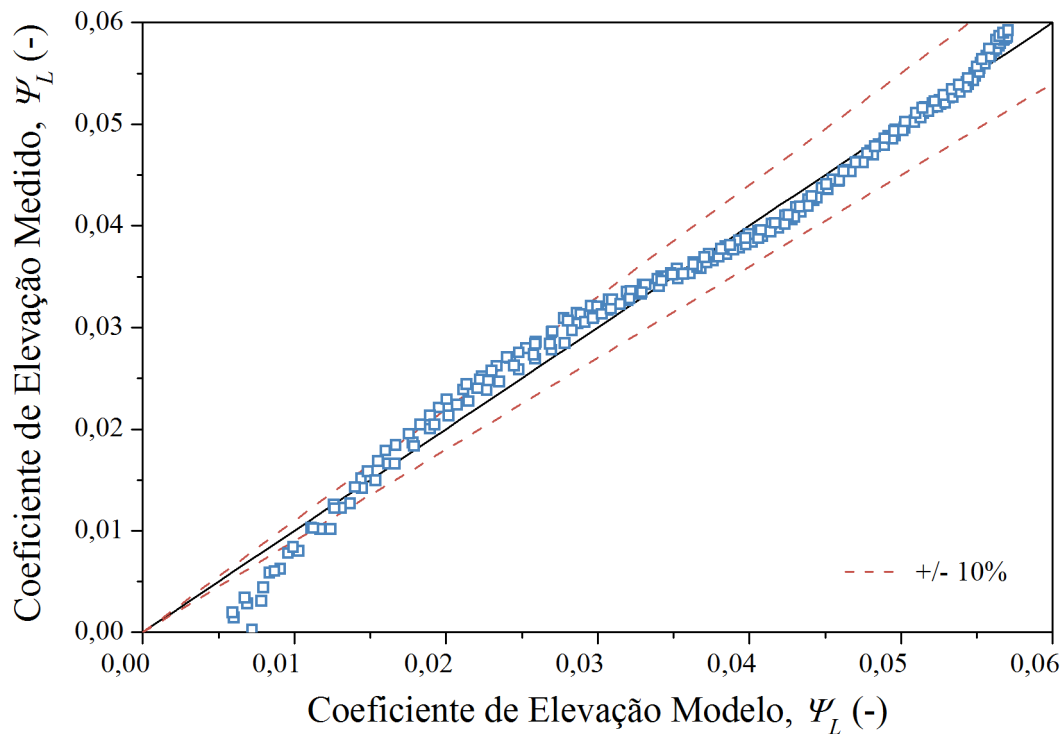


Figura 5.4 – Comparação entre os coeficientes de elevação calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica com água.

Essa comparação revela uma boa concordância entre os resultados, mostrando que o modelo é capaz de representar adequadamente o desempenho monofásico da BCS operando com água. O maior desvio entre o valor medido e o calculado pelo modelo ocorre para coeficientes de vazão menores que 0,01, região referente ao ponto de *open-flow*. Para os demais pontos, o erro é restrito a faixa de +/-10%.

O cálculo das constantes do modelo de potência é realizado de forma semelhante ao cálculo do modelo de elevação. O ajuste das constantes  $z_0$ ,  $z_1$ ,  $z_3$ ,  $z_5$  e  $z_7$  para o modelo da potência consumida, Equação (5.26), são apresentadas na Tabela 5.2. Para esse ajuste, a norma foi de 0,00427.

Tabela 5.2 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica viscosa.

$z_0$	$z_1$	$z_3$	$z_5$	$z_7$
0,00343	0,00027	0,00409	2,22466	109,09147

As comparações entre os dados de potência medidos experimentalmente e os obtidos por meio do modelo ajustado são apresentadas na Figura 5.5 e Figura 5.7.

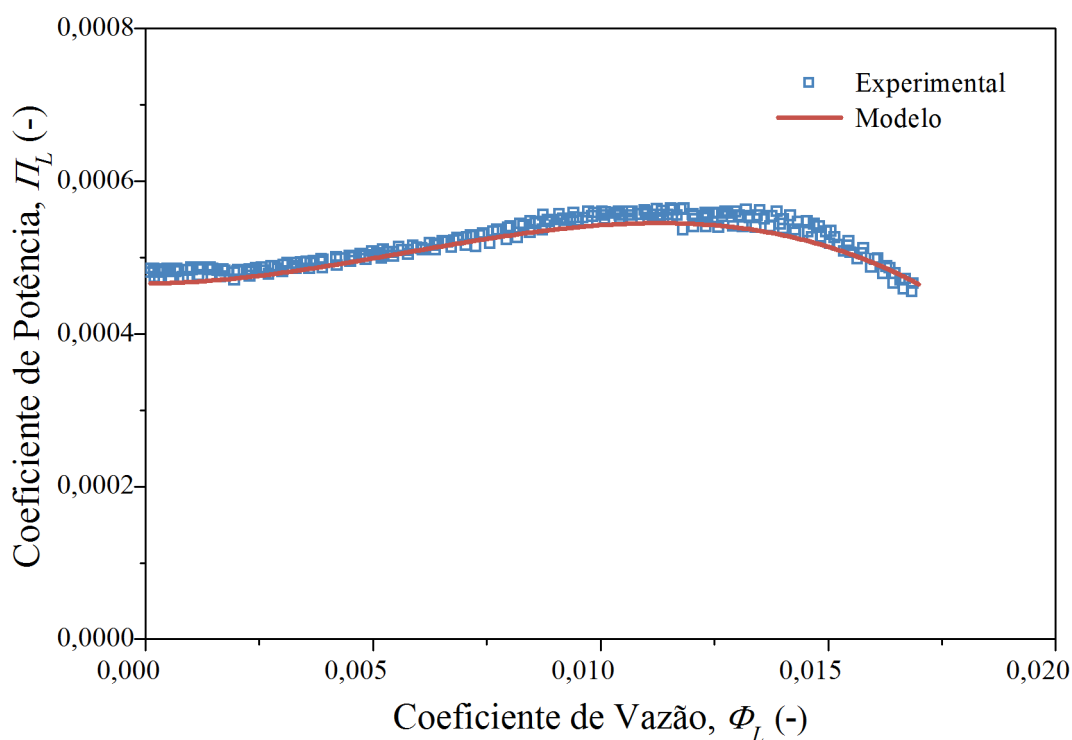


Figura 5.5 – Ajuste das constantes do modelo para a potência na operação monofásica com água.

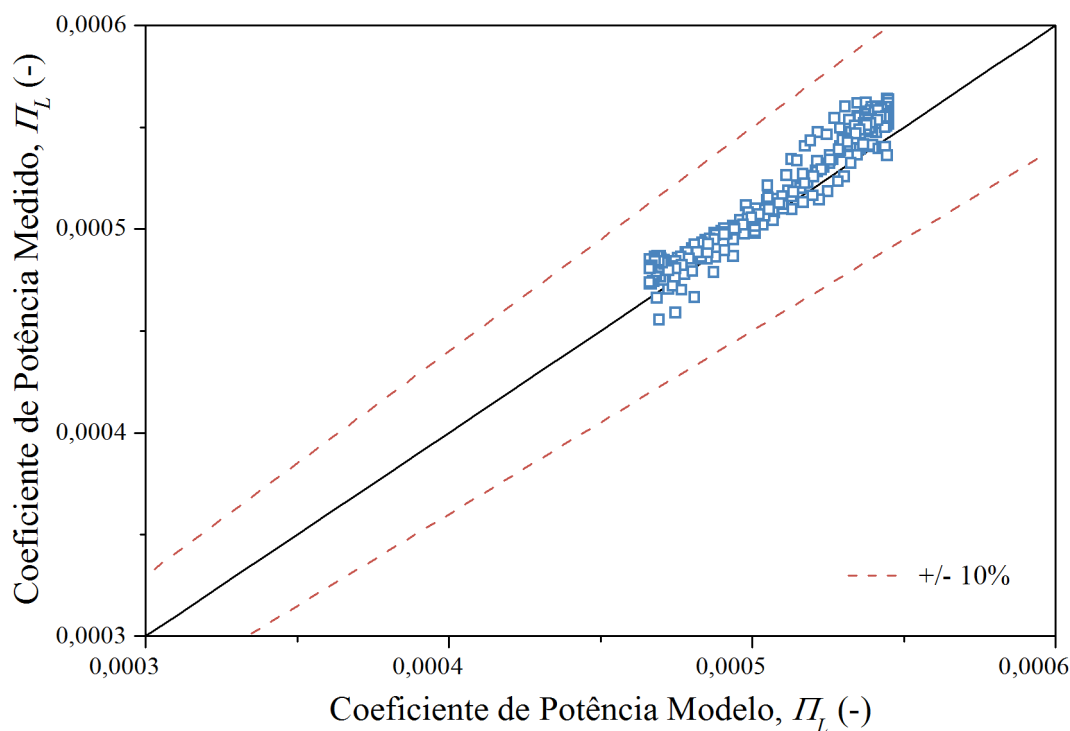


Figura 5.6 – Comparação entre os coeficientes de potência calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica com água.

Esses resultados revelam um comportamento adequado do modelo em relação aos dados experimentais. Os desvios entre a potências previstas pelo modelo e as medidas experimentalmente são inferiores a faixa de +/-10 %.

### 5.2.2 Escoamento Monofásico Viscoso

Para o escoamento monofásico de fluido viscoso, a elevação da BCS é representada pela Equação (5.13). Nessa equação, as constantes  $k_4$ ,  $k_5$  e  $k_6$  são as mesmas obtidas para o escoamento monofásico de água. Assim, o modelo viscoso tem como base o desempenho monofásico com água e são adicionados apenas os termos dissipativos devido a viscosidade. Portanto, torna-se necessário o ajuste, apenas, das constantes  $k_2$ ,  $k_3$  e  $n$ .

Para o ajuste dessas constantes foram considerados os resultados experimentais obtidos para a BCS GN5200 operando nas rotações entre 1800 e 3500 rpm e viscosidades variando de 12 a 1069 cP. A

Tabela 5.3 apresenta os valores das constantes  $k_2$ ,  $k_3$  e  $n$  ajustadas para a elevação da BCS GN5200 operando com fluido viscosos. Para esse ajuste a norma minimizada foi de 0,08480.

Tabela 5.3 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica viscosa.

$k_2$	$k_3$	$n$
34893,84328	522,20503	0,30487

Os desvios entre os coeficientes de elevação experimentais e os obtidos por meio do modelo ajustado são apresentadas na Figura 5.7.

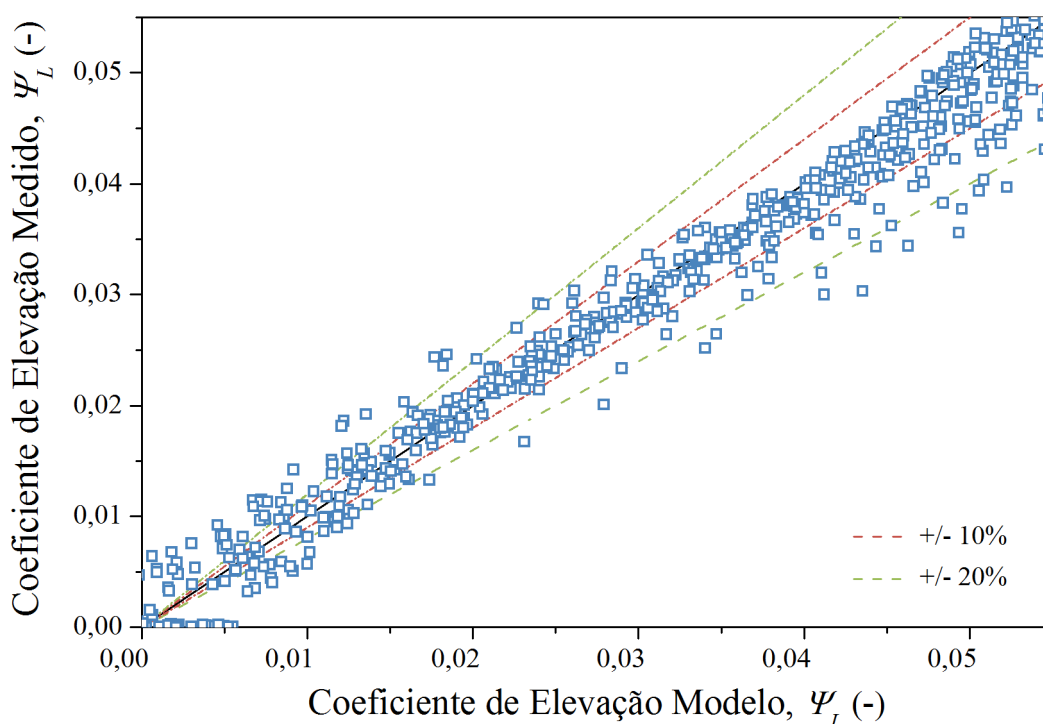


Figura 5.7 – Comparação entre os coeficientes de elevação calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica viscosa.

Esse resultado revela que o modelo ajustado apresenta um desvio que aumenta conforme diminui o valor do coeficiente de elevação. Conforme apresentado na seção anterior, o ajuste monofásico para água revela a mesma tendência. Isso aponta que o modelo não possui um comportamento adequado para altas vazões.

O modelo que representa a potência consumida na operação com fluido viscoso utiliza como base as constantes  $z_0, z_1, z_3, z_5$  e  $z_7$  ajustadas para a operação com água. Portanto, são necessários os ajustes das constantes  $z_2, z_4$  e  $z_6$  para a obtenção completa do modelo incluindo as dissipações viscosas.

Os valores ajustados para as constantes  $z_2$ ,  $z_4$  e  $z_6$  são apresentados nas Tabela 5.4. Para esse ajuste foi obtida uma norma de 0,00729.

Tabela 5.4 – Ajuste das constantes para a elevação na operação monofásica viscosa.

$z_2$	$z_4$	$z_6$
6,82970	200,90677	70173,40116

Os desvios entre os coeficientes de potência experimentais e os obtidos por meio do modelo ajustado são apresentadas na Figura 5.8. Esses resultados revelam que o desvio entre o valor medido e o calculado pelo modelo excedem, consideravelmente, a faixa de  $\pm 20\%$ .

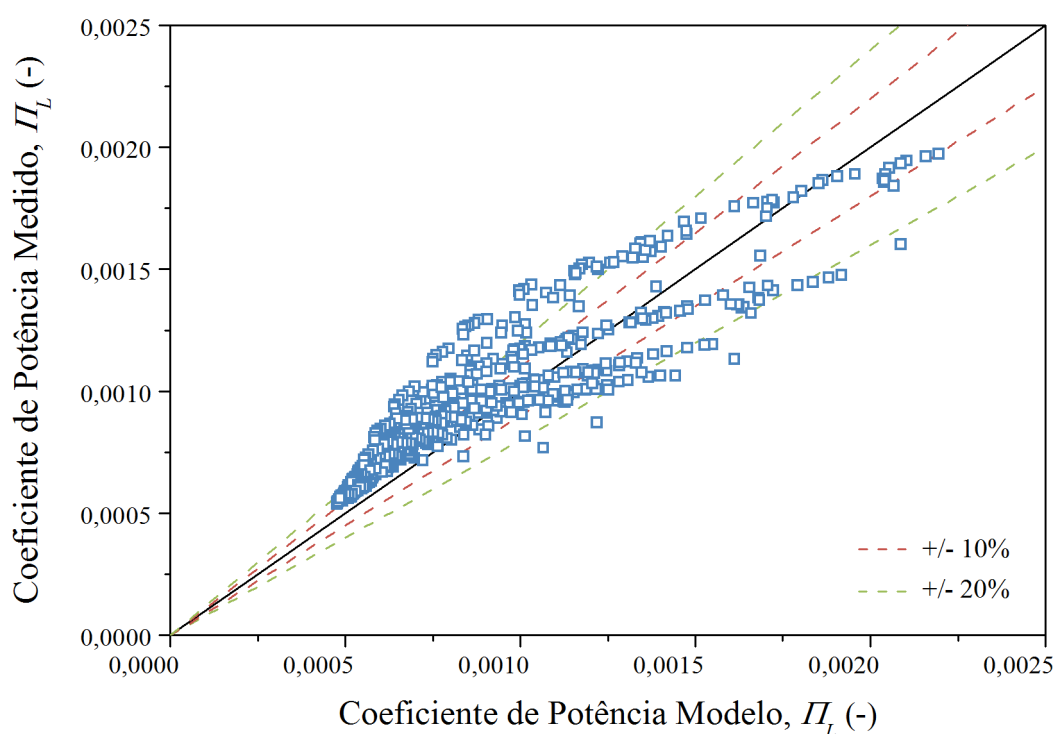
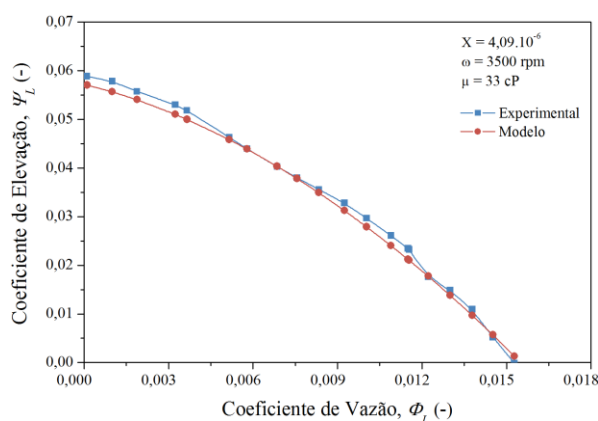
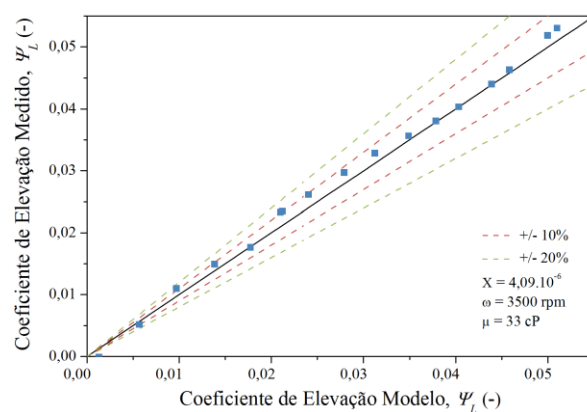


Figura 5.8 – Comparação entre os coeficientes de potência calculados pelo modelo e os medidos experimentalmente, operação monofásica viscosa.

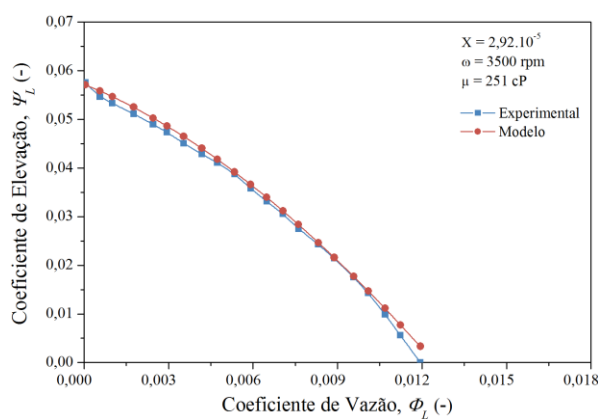
Na Figura 5.9 e Figura 5.10 é apresentada a comparação realizada entre os dados experimentais e os resultados previstos pelo modelo para a rotação de 3500 rpm, e viscosidades de 33, 210 e 600 cP.



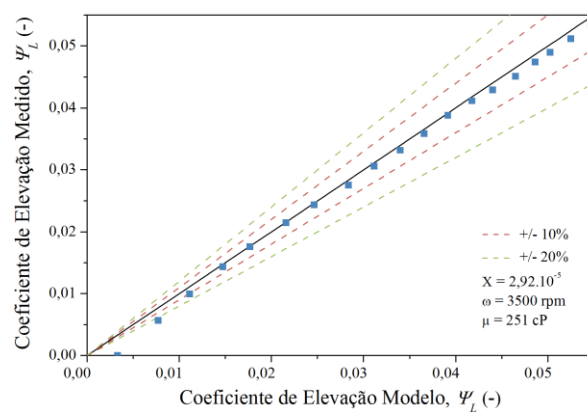
(a)



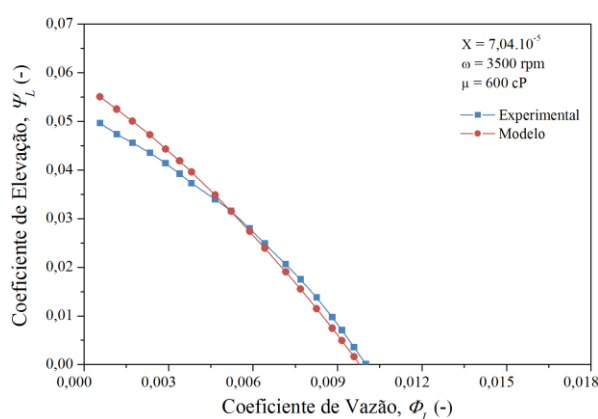
(b)



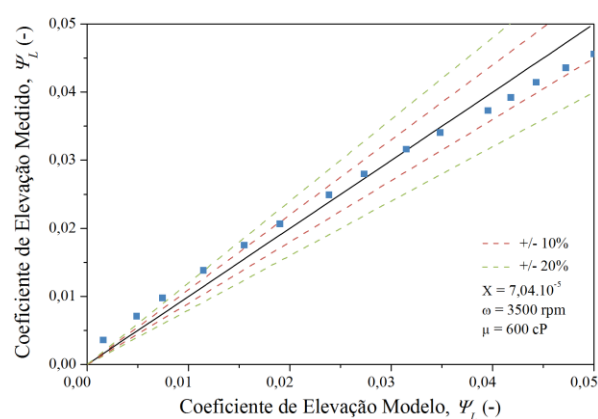
(c)



(d)



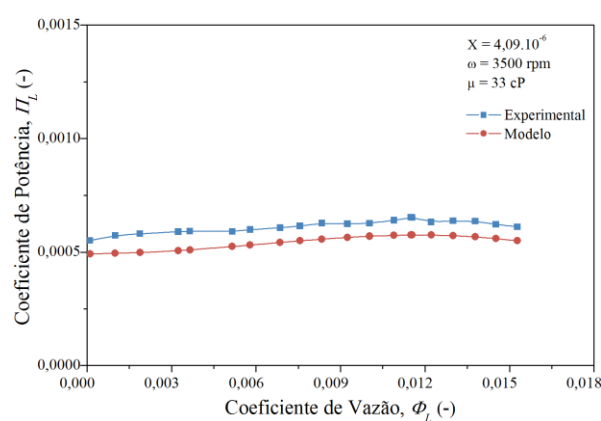
(e)



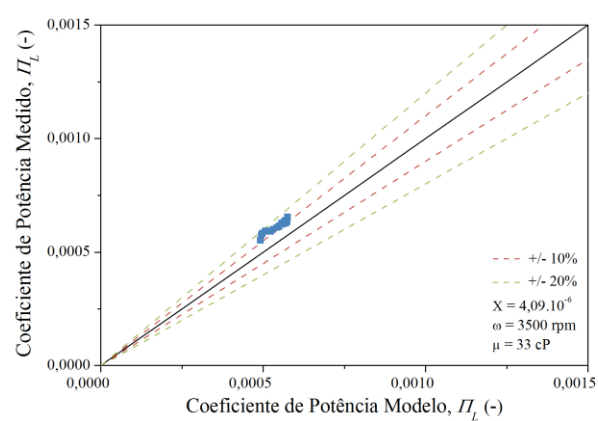
(f)

Figura 5.9 – Comparação entre a elevação medida experimentalmente e a calculada pelo modelo ajustado, rotação de 3500 rpm e viscosidades de 33, 251 e 600 cP.

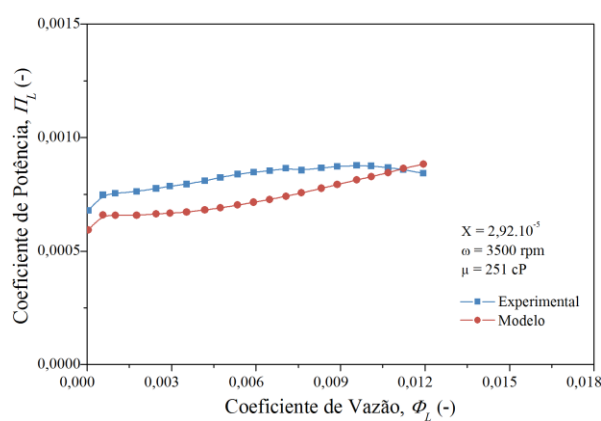




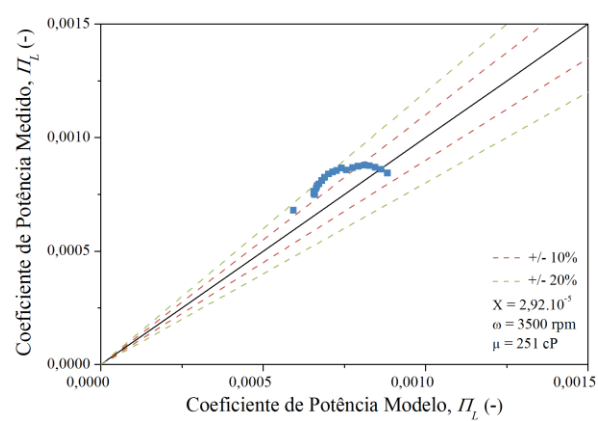
(a)



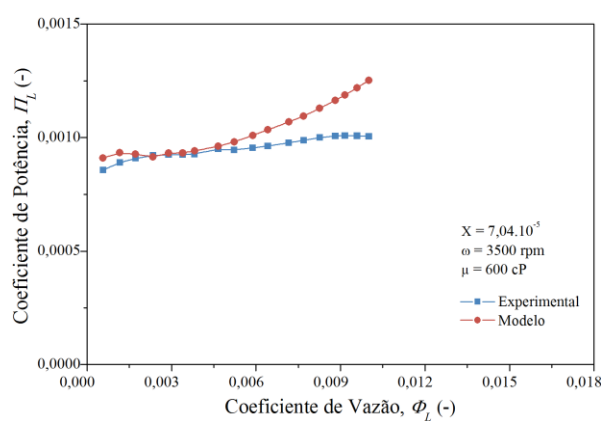
(b)



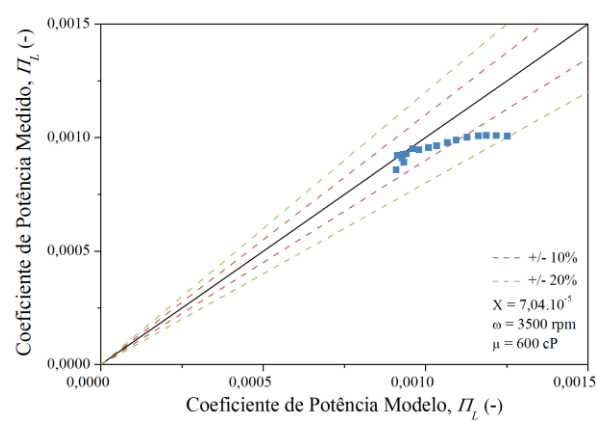
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.10 – Comparação entre a potência medida experimentalmente e a calculada pelo modelo ajustado, rotação de 3500 rpm e viscosidades de 33, 251 e 600 cP

Os resultados de elevação, Figura 5.9, apresentam uma boa concordância entre o valor medido e o ajustado, sendo os desvios restritos a faixa de  $\pm 20\%$ . No entanto, os resultados de potência, Figura 5.10, apresentam um desvio maior, indicando que o modelo de potência necessita de melhorias.

## 6 CONCLUSÕES

Em relação ao presente trabalho são obtidas as seguintes conclusões:

- Baseado nas imagens obtidas para os testes do protótipo com a mistura bifásica água-ar, foram identificados quatro padrões de escoamento no interior do impelidor: *Bubble Flow*, *Agglomerated Bubble Flow*, *Gas Pocket Flow* e *Segregated Flow*.
- O fenômeno de *Surging* foi associado com o padrão de escoamento classificado como *Gas Pocket Flow*, em que tem início a coalescência das bolhas no interior do impelidor.
- O *Gas Locking* é associado com o padrão *Segregated Flow*. Nesse arranjo a fase gasosa torna-se contínua, reduzindo a área disponível ao escoamento e afetando a transferência de energia ao fluido.
- Os mesmos padrões de escoamento identificados para a mistura água-ar são observados para a operação bifásica com fluido viscoso. No entanto, o padrão *Bubble Flow* é extremamente restrito, ocorrendo para frações de gás próximas de zero. Nesses pontos, as bolhas de gás não possuem formato esférico. O diâmetro, acima do crítico, faz com que as bolhas sejam intensamente deformáveis pelo escoamento.
- O efeito de degradação devido à viscosidade do líquido soma-se ao efeito de degradação causado pela fase compressível, reduzindo a capacidade da bomba de tolerar a presença de gás. As curvas de desempenho apresentam as mesmas características observadas no escoamento água-ar, porém com uma degradação do desempenho bastante acentuada.
- A redução da tensão superficial aumenta a tolerância da bomba à presença de gás. Em todas as vazões de gás, foi observado que a redução da tensão superficial desloca o ponto de *Surging* para a esquerda da curva de desempenho, indicando que o ponto de máximo da curva ocorre para frações gás mais elevadas. Para as condições operacionais a direita do ponto de *Surging*, não é observado uma melhora significativa do desempenho da bomba devido a redução da tensão superficial. O aumento da tolerância da bomba à presença de gás está diretamente relacionado com a mudança do padrão de escoamento no impelidor. A redução da tensão superficial dificulta a coalescência das bolhas e retarda a transição entre as fases, fazendo com que ela ocorra para frações de gás mais elevadas.
- Para a operação de BCSs com fluidos viscoso, observou-se um intenso degradação do desempenho. A vazão e a elevação do BEP diminuem, deslocando a eficiência

máxima para a esquerda da curva. A potência consumida sofre um aumento acentuado, enquanto a bomba perde capacidade de transferir energia ao fluido, resultando em uma redução consideravelmente sua eficiência.

- Em aplicações com fluidos de elevada viscosidade, o aquecimento do meio pode ser estimado considerando o balanço de energia através da bomba. O aquecimento estágio a estágio reduz gradualmente a viscosidade do fluido, melhorando o desempenho dos estágios finais da bomba. Portanto, em bombas com algumas dezenas ou centenas de estágios, a análise do ganho de temperatura torna-se relevante no dimensionamento do equipamento.

- Os fatores de correção de vazão, elevação e eficiência aumentam em função da rotação da bomba. Assim, quanto maior a rotação, menor é a degradação do desempenho devido aos efeitos viscosos. A diminuição das perdas viscosas devido ao aumento da rotação pode ser explicada pela análise do número de Reynolds. Com o aumento da rotação, a vazão aumenta, aumentando o número de Reynolds e diminuindo o fator de atrito.

- A comparação entre os fatores de correção viscosos obtidos experimentalmente e os fornecidos pelos principais métodos de correção apresentam elevados desvios. Esses desvios podem ser interpretados devido a BCS GN5200 estar fora dos limites de aplicação das correções, justificando a proposta de uma metodologia específica para a correção do desempenho viscoso.

- Em relação a pressão de sucção, observou-se uma tendência de aumento de desempenho devido ao seu incremento. Possivelmente, a pressão de entrada atua no diâmetro das bolhas na sucção da bomba. Com a elevação da pressão o diâmetro das bolhas se reduz, dificultando sua coalescência. Isso faz com que a transição do padrão de escoamento no interior do impelidor ocorra para frações de gás maiores, deslocando o ponto de *Surging* para a direita da curva de desempenho.

- A massa específica do gás, também, é influenciada pela pressão de entrada. Devido à compressibilidade da fase gasosa, o incremento da pressão de sucção resulta no aumento da massa específica, reduzindo a diferença entre as densidades das fases. A redução da diferença entre as massas específicas diminui o efeito de segregação causada pelo campo centrífugo, contribuindo para a melhoria de desempenho da bomba.

- Em relação a rotação, não foi observada uma influência significativa no desempenho da bomba operando com a mistura água-ar.

- A análise do incremento de pressão por estágio revelou a tendência do primeiro estágio de apresentar uma maior degradação em relação aos demais. O aumento da tolerância do gás em função do número de pode ser explicada por dois fatores: a diminuição da fração volumétrica do gás ao longo dos estágios e o efeito de quebra de bolhas causadas pelo impelidor.

- Em relação a vazão de líquido, observou-se que a tolerância da bomba a presença de gás aumenta com a diminuição da vazão. Considerando uma rotação constante, a redução da vazão de líquido diminui a força de arrasto que tendem a carregar as bolhas para fora do impelidor. No entanto, quanto menor a vazão maior a pressão gerada pela bomba, sendo esse efeito maior do que o devido a redução da força de arrasto.

- A investigação dos efeitos da inclinação no desempenho da BCS revelou que para a vazão de 0,75.BEP não existe influência significativa da inclinação no ganho de pressão. No entanto, para as vazões do BEP e 1,25.BEP, o efeito da inclinação foi mais acentuado. O aumento da inclinação além de melhorar o desempenho da bomba, desloca o ponto de *Surging* para vazões de gás mais elevadas.

- Diferentemente do observado para a mistura água-ar, os resultados para a mistura de fluido viscoso-ar revelam uma influência mais significativa da rotação no desempenho bifásico da BCS. O aumento da rotação melhora o desempenho bifásico da bomba.

Baseados nas conclusões citadas anteriormente são sugeridas algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Realizar estudos de visualização do escoamento gás-líquido em impelidores de BCSs com geometria de fluxo misto e axial.

- Definir as fronteiras das transições entre os padrões de escoamento gás-líquido no interior de impelidores de BCS.

- Estudar a operação de BCSs com escoamento bifásico líquido-líquido formado por emulsões água-óleo.

- Em relação a operação monofásica com fluido viscoso, é sugerido a realização de testes de desempenho com uma gama representativa de modelos de BCSs, visando estender as correlações proposta para os fatores de correção de elevação, vazão e eficiência.

- Estender a matriz experimental realizada para os testes bifásico glicerina-ar abrangendo viscosidades ainda não testadas.
- Verificar a influência da geometria da sucção na operação de BCSs, destacando a possibilidade da ocorrência de intermitência do escoamento gás-líquido.

## REFERÊNCIAS

- Amaral, G. D. L. Modelagem do Escoamento Monofásico em Bomba Centrífuga Submersa Operando com Fluidos Viscosos. 2007. 233p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- Andras, E. Two Phase Flow Centrifugal Pump Performance, Ph.D. Dissertation, Idaho State University, 1997.
- Banjar, H. M., Zhang, H-Q, Gamboa, J. Experimental Study of Liquid Viscosity Effect on Two-Phase Stage Performance of Electrical Submersible Pumps. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- Barrios, L. J. Visualization and Modeling of Multiphase Performance Inside an Electrical Submersible Pump. Tese (Doutorado), Petroleum Engineering Department, University of Tulsa, 2007.
- Biazussi, J. L. Modelo de Deslizamento para Escoamento Gás-Líquido em Bombas Centrífuga Submersa Operando com Fluido de Baixa Viscosidade. 240 p. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia do Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- Cirilo, R., Air-Water Flow Through Electrical Submersible Pumps. Dissertação (Mestrado), The University of Tulsa, 1998.
- Drozдов, A. N. Stand Investigations of ESPs and Gas-Separators Characteristics on Gas/Liquid Mixtures with Different Values of Free-Gas Volume Intake Pressure Foaminess and Viscosity of Liquid. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2010.
- Duran, J. Pressure Effects on ESP Stages Air-Water Performance. 171 p. Dissertação (Mestrado), The University of Tulsa (2003).
- Estevam, V. Uma Análise Fenomenológica da Operação de Bomba Centrífuga com Escoamento Bifásico. 2002. 265p. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

- Flatern, R. V. The Defining Series – Electrical Submersible Pumps, Oilfield Review, 2015.
- Gamboa, J. Predication of the Transition in Two-Phase Performance of an Electrical Submersible Pump. Tese (Doutorado), Petroleum Engineering Department, University of Tulsa, 2009.
- Govier, G. W., Aziz, K. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1972.
- Gülich, J. F. Centrifugal Pumps. Berlin, Springer, 2008.
- Gülich, J. F. Pumping Highly Viscous Fluids with Centrifugal Pumps - Part 1. World Pumps, v. 1999, n. 395, p. 30-34, 1999a.
- Gülich, J. F. Pumping Highly Viscous Fluids with Centrifugal Pumps - Part 2. World Pumps, v. 1999, n. 396, p. 39-42, 1999b.
- Hydraulic Institute Standards, Determination of Pump Performance When Handling Viscous Liquid. 10th Edition, 1955.
- Hydraulic Institute Standards. Effects of Liquid Viscosity on Rotor Dynamic Pump performance, ANSI-HI 9.6.7-2010, 2010.
- Kim, J.H., Duffey, R.B., Belloni, P. On Centrifugal Pump Head Degradation in Two-Phase Flow. Design method for two-phase flow in Turbomachinery, ASME Mechanics Conference, 26 Albuquerque, NM. June 24-26, 1985.
- Kline, S.J; McClintock, E.J., Uncertainties in Single-Sample Experiment. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge, v.73, p.3-8., 1953.
- Lea, J.F. Bearden, J. L. Effect of gaseous fluids on submersible pump performance. Journal of Petroleum Technology SPE, v. 9218, p. 2922-2930, 1982.
- Minemura, K., Murakami, M. A theoretical study on air bubble motion in a centrifugal pump impeller, ASME J. Fluids Eng. (JFE) 102, 446–455. 1980.
- Moffat, R.J., Describing the uncertainties in experimental results. Experimental Thermal and Fluid Science, New York, 1988.



- Monte Verde, W., Biazussi, J. L., Bannwart, A. C., Arrifano, N. A., Estevam, V. Gas and Viscous Effects on the ESPs Performance. SPE Artificial Lift Conference-Americas, Colombia, 2013.
- Murakami, M., K. Minemura. Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump (First Report, Performance and Flow Conditions), Bulletin of the JSME, 17.110 (1974a): 1047-1055, 1974.
- Murakami, M., Minemura, K. Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump (Second Report, Effects of Number of Blades), Bulletin of the JSME, 17.112 (1974b): 1286-1295, 1974.
- Ofuchi, E. M. Desenvolvimento de um método para correção de curvas de desempenho em bombas centrífugas submersas operando com fluidos viscosos. 2015. 132p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- Patel, B. R., Runstadler, P. W. Investigations into the Two-Phase Behavior of Centrifugal Pumps, Proc. of Polyphase Flow in Turbomachinery, ASME, 1978.
- Paternost, G. M. Estudo experimental sobre bomba centrífuga operando com fluido viscoso e escoamento bifásico gás-líquido. 158 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências e Engenharia de Petróleo, Departamento de Engenharia do Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- Pessoa, R., Prado, M. Experimental investigation of two-phase flow performance of electrical submersible pump stages. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2001
- Poullikkas, A. Effects of Two-Phase Liquid-Gas Flow on the Performance of Nuclear Reactor Cooling Pumps, Progress in Nuclear Energy, 42.1, 3- 10, 2010.
- Rosa, E. S. Escoamento Multifásico Isotérmico: Modelos de Multifluidos e de Mistura. Porto Alegre: Bookman, 260 p. 2012.
- Sachdeva, R., Two-Phase Flow Through Electric Submersible Pumps”, Tese (Doutorado), University of Tulsa, USA, 1989.

- Sato S., Furukawa, A., Takamatsu, Y. Air-Water Two-Phase Flow Performance of Centrifugal Pump Impellers with Various Blade Angles, JSME International Journal, 39.2, 223-229, 1996.
- Segala, W. Simulação Numérica do Escoamento Monofásico no Primeiro Estágio de uma Bomba Centrífuga de Duplo Estágio. 2010. 112p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- Sekoguchi, K., Takada, S., Kanemori, Y. Study of Air-Water Two-Phase Centrifugal Pump by Means of Electric Resistivity Probe Technique for Void Fraction Measurement (First Report), Bulletin of JSME, 27.227, 1984.
- Shoham, O. Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2006.
- Sirino, T. Estudo da influência da viscosidade no desempenho de uma bomba centrífuga submersa. 2013. 114p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- Solano, A. E. Viscous Effects on The Performance of Electro Submersible Pumps (ESP's). 2010. 145p. Dissertação (Mestrado) – The University of Tulsa, Oklahoma, 2010.
- Stepanoff, A. J. How Centrifugals Perform When Pumping Viscous Oils, Power, 85-87, March 1949.
- Suryawijaya, P., Kosyna, G. Unsteady Measurement of Static Pressure On the Impeller Blade Surfaces and Optical Observation on Centrifugal Pumps Under Varying Liquid/Gas Two-Phase Flow Condition, Journal of Computational and Applied Mechanics, 2.1: D9-D18, 2001.
- Takemura T., Kato, H., Kanno H., et al. Development of Rotordynamic Multiphase Pump: The First Report, Pipeline Technology, 5, 1997.
- Thum, D., Hellmann, D. H., Sauer, M. Influence of the Patterns of Liquid Gas Flows on Multiphase-Pumping of Radial Centrifugal Pumps, 5th North American Conference on Multiphase Technology, 79-90, 2006.

- Trevisan, F. E. Modeling and Visualization of Air and Viscous Liquid in Electrical Submersible Pump. Tese (Doutorado), Petroleum Engineering Department, University of Tulsa, 2009.
- Turpin, J. L., Lea, J. F., Bearden, J. L. Gas-Liquid flow through centrifugal pumps—correlation of data. Proceeding of the Third International Pump Symposium, 13-20. Texas A&M University, 1986.
- Turzo, Z., Takacs, G., Zsuga, J. A Computerized Model for Viscosity Correction of Centrifugal Pump Performance Curves. 47th Southwestern Petroleum Short Course, Texas, 2000.
- Vieira, T. S. Modelagem Numérica das Perdas de Carga no Escoamento Monofásico em Rotor de Bomba Centrífuga Submersa Utilizada na Elevação de 116 Petróleo. 2014. 203p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goitacazes, 2014.
- White, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6ª ed. McGraw Hill Brasil, 2011.
- Zhang, J., Cai, S., Li, Y., Zhu, H., Zhang, Y. Visualization Study of Gas-Liquid Two-Phase Flow Patterns Inside a Three-Stage Rotodynamic Multiphase Pump. Experimental Thermal and Fluid Science 70, 125-138. 2015.
- Zuber, N. Findlay, J. A. Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems. Journal of Heat Transfer, New York, p. 453-468, 1965.

## APÊNDICE A - PROTÓTIPO DE VISUALIZAÇÃO

Neste apêndice, são apresentados os detalhes construtivos do protótipo de visualização utilizado na Montagem Experimental A.

Na Figura A.1 é apresentada a montagem do tubo de entrada e do estator de saída. O estator de saída foi desenvolvido com a finalidade de permitir o acesso visual ao interior do impelidor. A curvatura das pás do estator foi projetada de forma a ter um ângulo de entrada igual ao ângulo de saída do fluido que deixa o impelidor, diminuindo as perdas hidráulicas por choque.



Figura A.1 – Tubo de entrada e estator de saída.

Na Figura A.2, é apresentada a montagem dos estatores de entrada e saída. O estator de entrada, sem modificações, foi utilizado com o objetivo de diminuir o efeito de pré-rotação do fluido, devido ao eixo de acionamento.

Na Figura A.3, é apresentado o impelidor modificado, que é montado sobre o estator de entrada. O impelidor teve o *shroud* superior removido, permitindo o acesso visual ao seu interior.

Na Figura A.4, é apresentada a montagem final da janela de visualização. O impelidor recebeu um novo *shroud* fabricado em acrílico transparente, que serve, também, de suporte para um dos aros utilizados na vedação. O segundo aro do selo mecânico é fixo na tampa no estator de saída. As molas dispostas radialmente na tampa do estator têm a função de compensar o movimento axial das partes móveis, mantendo o contato entre as faces dos aros de vedação. Sobre as molas, são montados parafusos para ajustar a pré-carga de compressão.

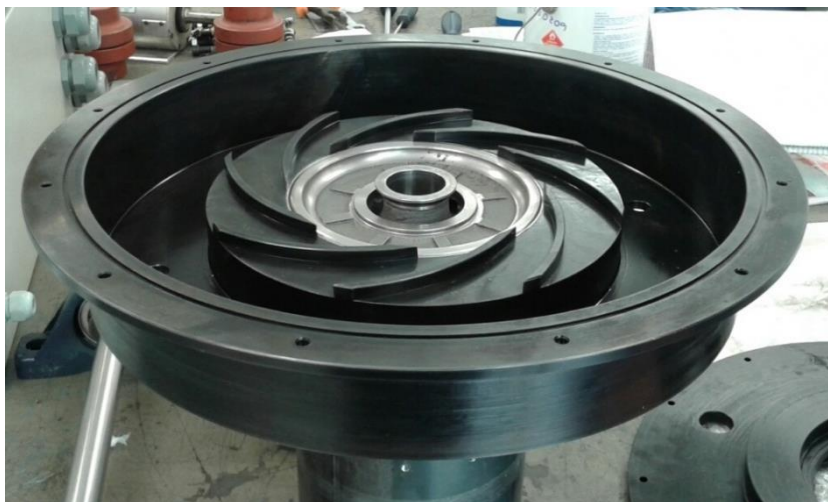


Figura A.2 – Estatores de entrada e saída.



Figura A.3 – Impelidor modificado montado sobre o estator de entrada.

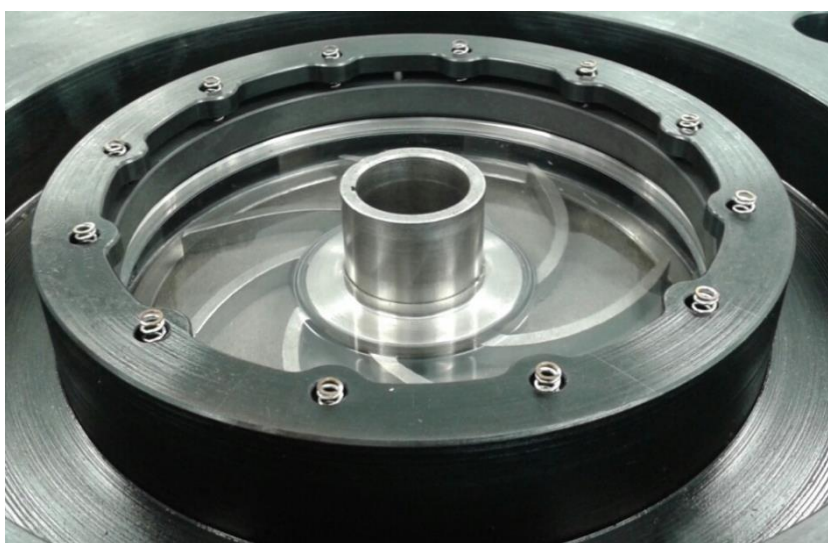
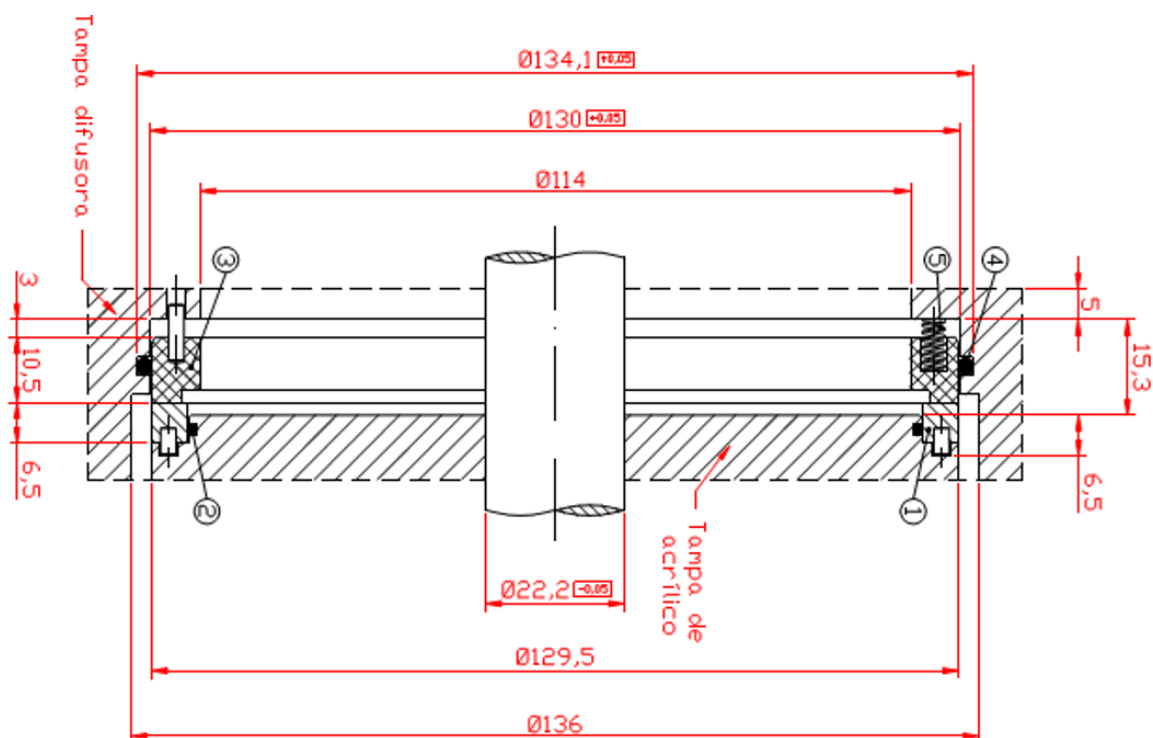


Figura A.4 – Montagem final do conjunto.

Na Figura A.5, é apresentado o projeto do selo mecânico de faces. A sede rotativa do selo, fabricada em aço inox, é fixada no *shroud* de acrílico do impelidor. A sede estacionária, fabricada em carbono, é fixada na tampa do estator de saída. A vedação entre a sede estacionária e a fixa é obtido pelo contato mecânico das faces retificadas dos materiais.



5	Mola	038M040CP	F	12
4	O-ring estacionário	1295B160	V	01
3	Sede estacionária	1140E817DZ	B1	01
2	O-ring rotativo	1140I047	V	01
1	Sede rotativa	1140R816DZ	F	01
Pes.	Denominação	Código	Material	Qtd.

#### Materiais

F - Aço Inox 304  
V - Viton  
B1 - Carbono duro

Figura A.5 – Montagem do selo mecânico.

O *shroud* em acrílico e a detalhe interno da tampa do estator de saída são mostrados na Figura A.6 e Figura A.7, respectivamente.

Na Figura A.8, é apresentado o projeto do *skid* de testes, em que é utilizado o protótipo de visualização. O *skid* de testes é composto pela bomba protótipo, mancais, torquímetro e motor elétrico. Todo o conjunto é montado em uma base que pode rotacionar, possibilitando a operação da bomba desde a horizontal até a vertical.

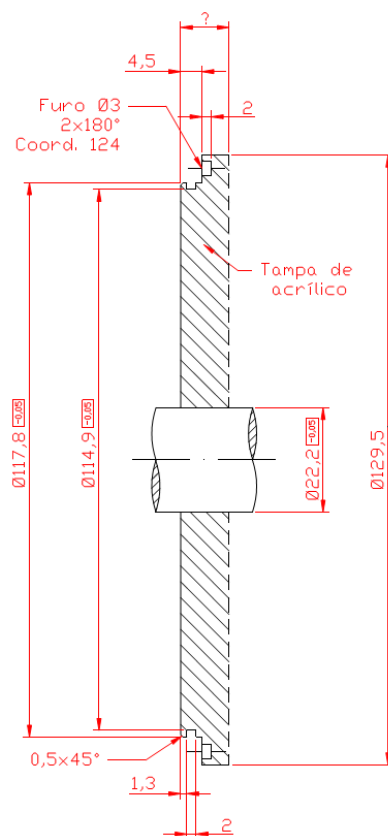


Figura A.6 – *Shroud* em fabricado em acrílico transparente.

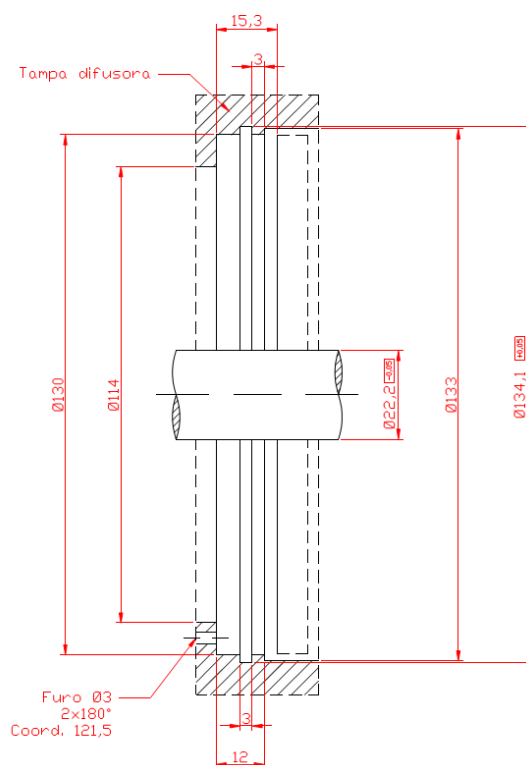


Figura A.7 – Detalhe interno da tampa do estator de saída.

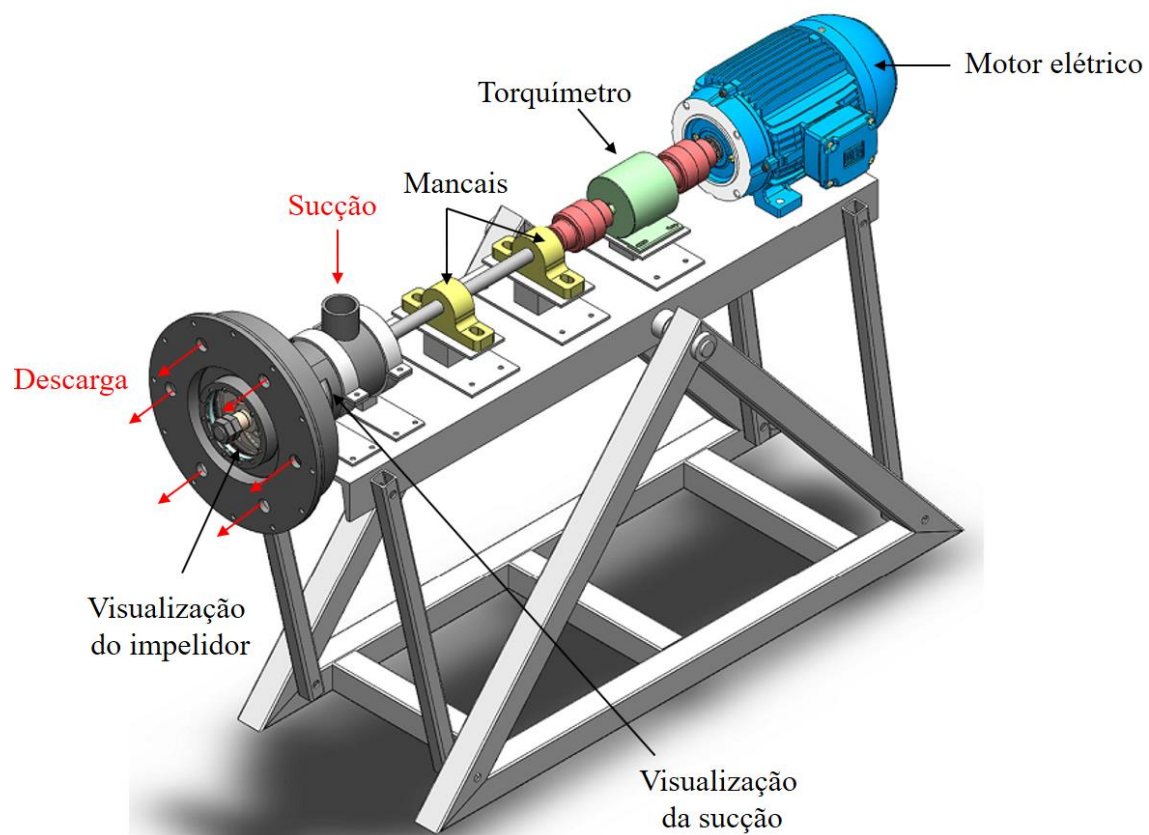


Figura A.8 – Skid de testes da Montagem Experimental A.



## APÊNDICE B - CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Neste apêndice, são apresentadas as informações referentes aos processos de calibração dos instrumentos de medição utilizados nas Montagens Experimentais A e B.

A calibração dos instrumentos é fundamental para garantir a qualidade das medições experimentais. No processo de calibração, o valor medido pelo instrumento é comparado ao valor estabelecido por padrões e, assim, pode-se estabelecer a incerteza da medição.

Os transdutores de pressão foram calibrados por meio de um calibrador Druck DPI 615 com precisão de 0,1 kPa. O procedimento de calibração consiste em, por meio do calibrador, aplicar uma pressão conhecida ao instrumento e medir o sinal analógico de saída correspondente à pressão aplicada. Esse sinal analógico de corrente elétrica, na faixa de 4-20 mA, é condicionado e salvo por meio de sistema de aquisição de dados National Instruments™. Esse procedimento é repetido aumentando-se a pressão até ser atingido o fundo de escala do sensor. Atingido esse valor máximo lido pelo instrumento, repete-se o procedimento diminuindo-se a pressão do valor máxima até a pressão atmosférica. A realização da calibração no sentido crescente e decrescente da medição tem como objetivo diminuir os erros de histerese do instrumento.

Os transdutores de pressão utilizados nas montagens experimentais A e B são do mesmo fabricante e funcionam segundo o princípio da variação de capacitância. Assim, o procedimento de calibração descrito foi utilizado em todos os medidores.

A medição de temperatura, em ambas as montagens, foi realizada por meio de termoresistências tipo PT-100 de três fios, classe A, conforme a norma DIN-IEC-751/85. Segundo a norma, os instrumentos da classe A apresentam incerteza, em °C, de  $\pm 0,15 + 0,002 \cdot T$ , em que T é a temperatura medida.

As termoresistências são ligados a transmissores destinados a converter o sinal de saída baseada em resistência em um sinal analógico de corrente elétrica de 4-20 mA. Essa conversão permite que o sinal seja enviado com maior imunidade a ruído, aumentando, assim, a distância entre o sensor e o sistema de aquisição de dados. A calibração das termoresistências foi feita por meio de um banho termostático e uma termoresistência padrão tipo PT100 de quatro fios, classe 1/10 DIN, de  $\pm 0,12^\circ\text{C}$  de incerteza para temperatura de  $100^\circ\text{C}$ . O

procedimento de calibração consiste em colocar as termoresistências imersas no banho termostático, fixar a temperatura do banho, medir essa temperatura por meio da termoresistência padrão e medir a corrente elétrica de saída dos transmissores. Repete-se esse procedimento tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento do banho, abrangendo toda a faixa de trabalho do instrumento, obtendo-se, assim, a relação temperatura *versus* corrente elétrica para os instrumentos.

Quanto ao torquímetro utilizado na Montagem Experimental B, a curva de calibração é fornecida pelo fabricante. Dessa forma, foi realizado, apenas, o ajuste da retransmissão do sinal analógico de saída do instrumento. O ajuste da retransmissão foi realizado aplicando-se um torque conhecido ao sensor e medindo-se o valor da corrente de saída (4-20 mA), obtendo-se, assim, a relação torque *versus* corrente elétrica. Esse procedimento de ajuste foi realizado aplicando-se o torque em ambos os sentidos de rotação.

Para a medição da vazão mássica de líquido e de gás foram empregados medidores tipo Coriolis, sendo o certificado de calibração desses instrumentos emitido pelo fabricante. O ajuste da retransmissão do sinal analógico de corrente (4-20 mA) foi feito utilizando-se, apenas, os limites de operação do instrumento, por meio de um ajuste linear.

A Figura B.1 e a Figura B.6 mostram as calibrações obtidas para os instrumentos de medição utilizados na Montagem Experimental A, enquanto a Figura B.7 a Figura B.14 apresentam as calibrações dos instrumentos utilizados na Montagem Experimental B.

As descrições das variáveis medidas por cada instrumento são apresentadas na Tabela 3.3 e Tabela 4.4. Nos gráficos das figuras abaixo, são apresentados, também, as equações de ajuste dos dados coletados, assim como o coeficiente de determinação  $R^2$ .

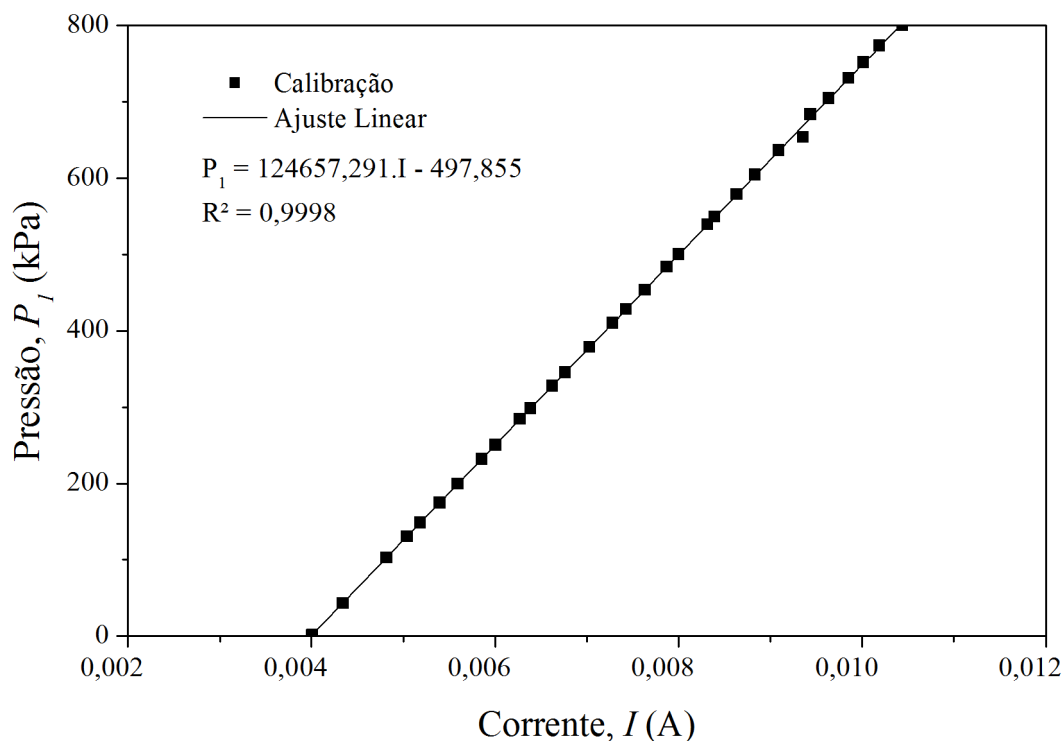


Figura B.1 – Curva de calibração do transdutor de pressão  $P_1$ .

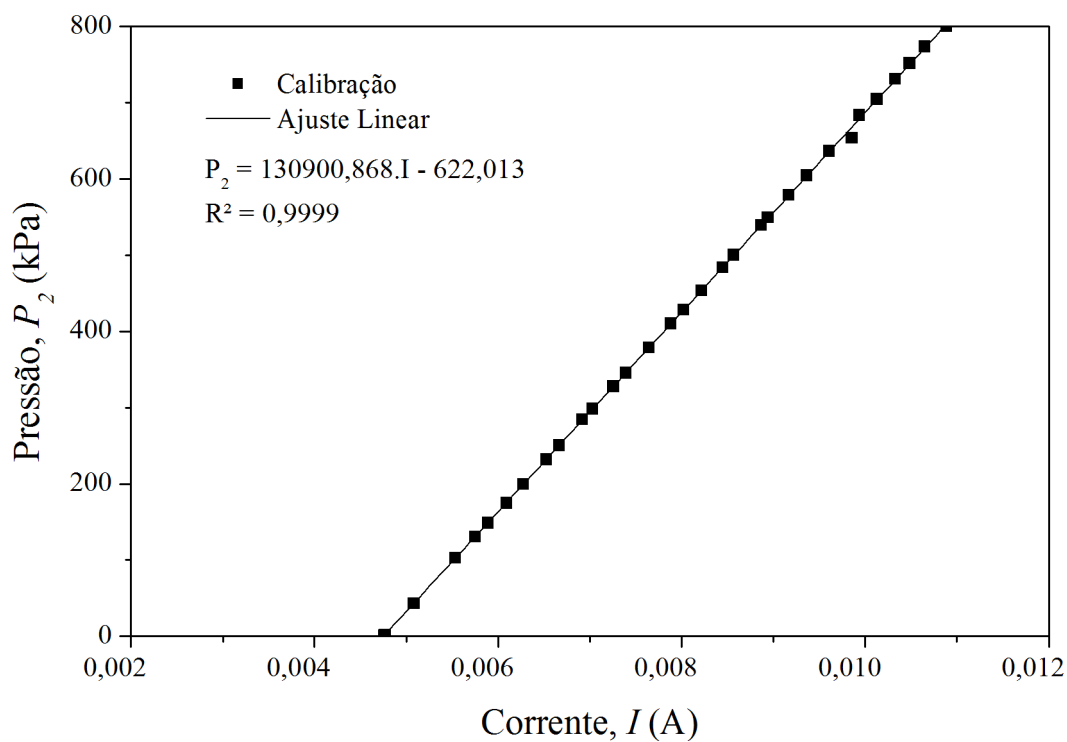


Figura B.2 – Curva de calibração do transdutor de pressão  $P_2$ .

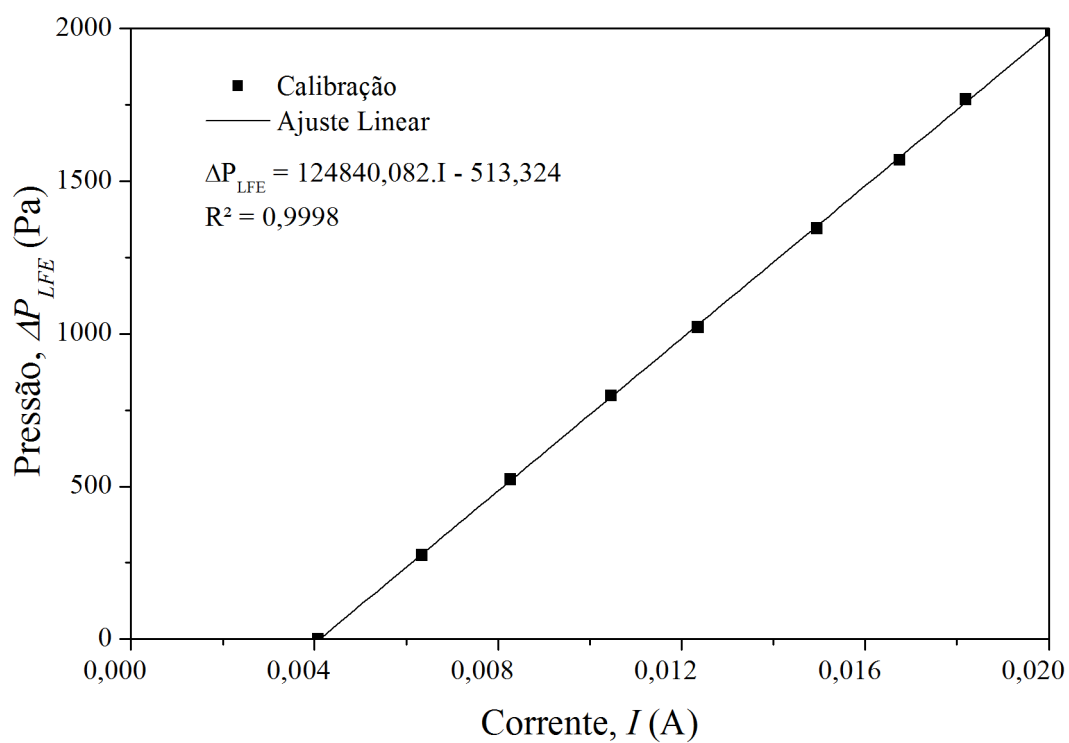


Figura B.3 – Curva de calibração do transdutor de pressão  $\Delta P_{LFE}$ .

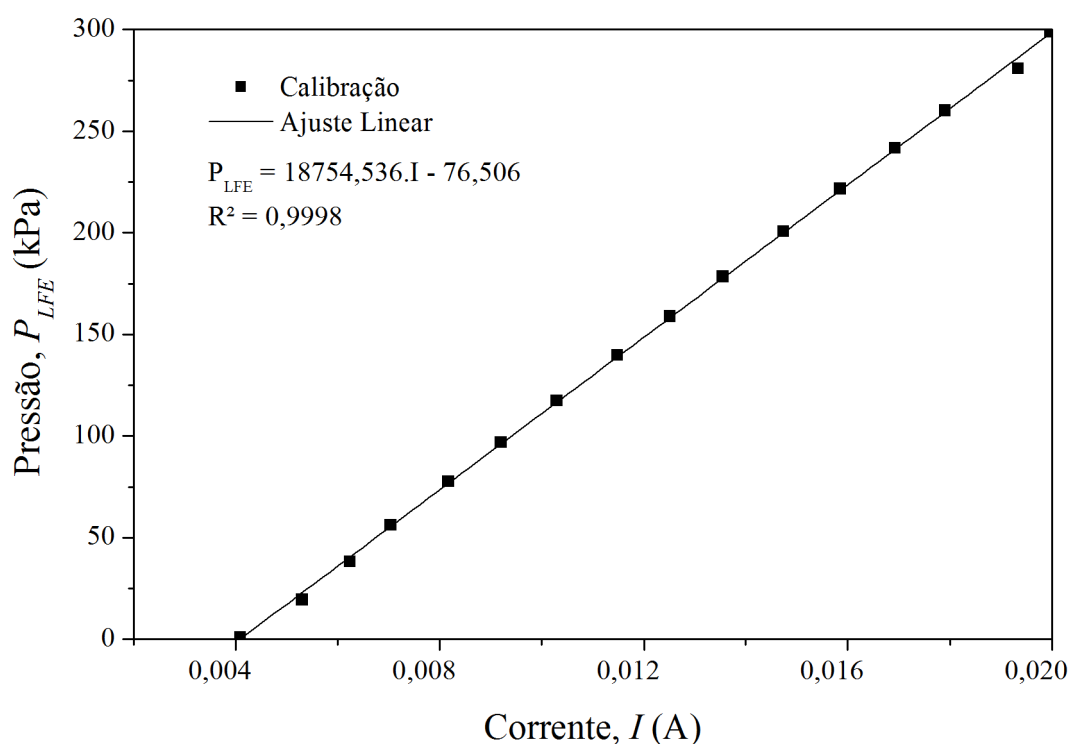


Figura B.4 – Curva de calibração do transdutor de pressão  $P_{LFE}$ .

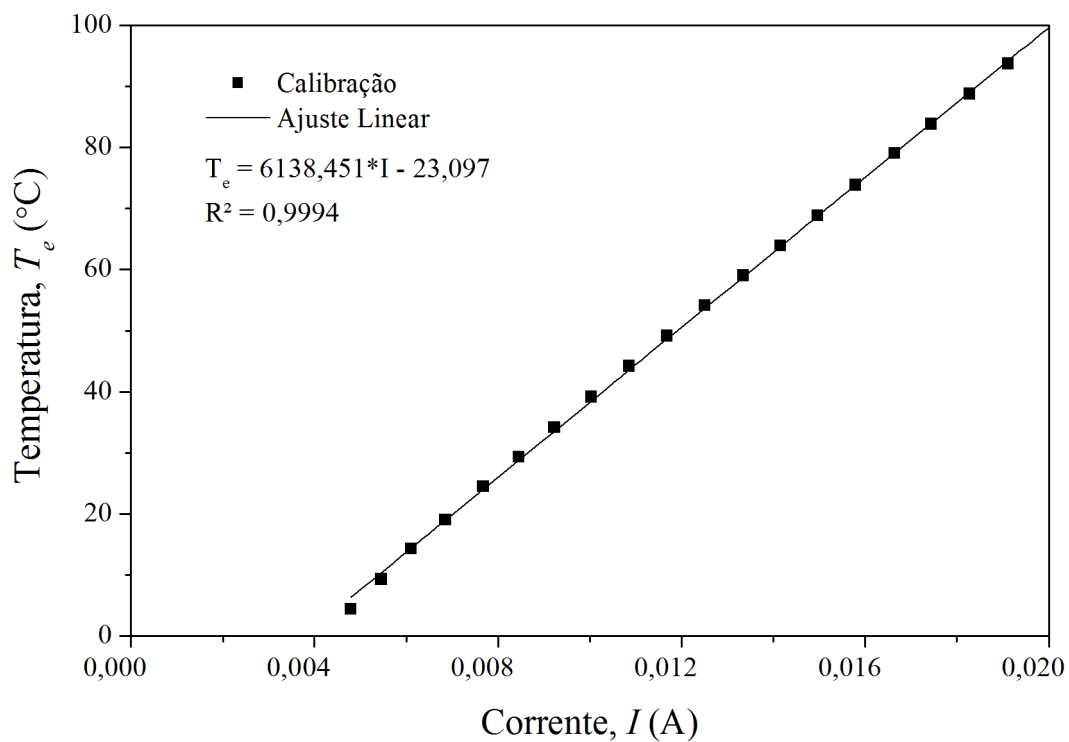


Figura B.5 – Curva de calibração da termoresistência  $T_e$ .

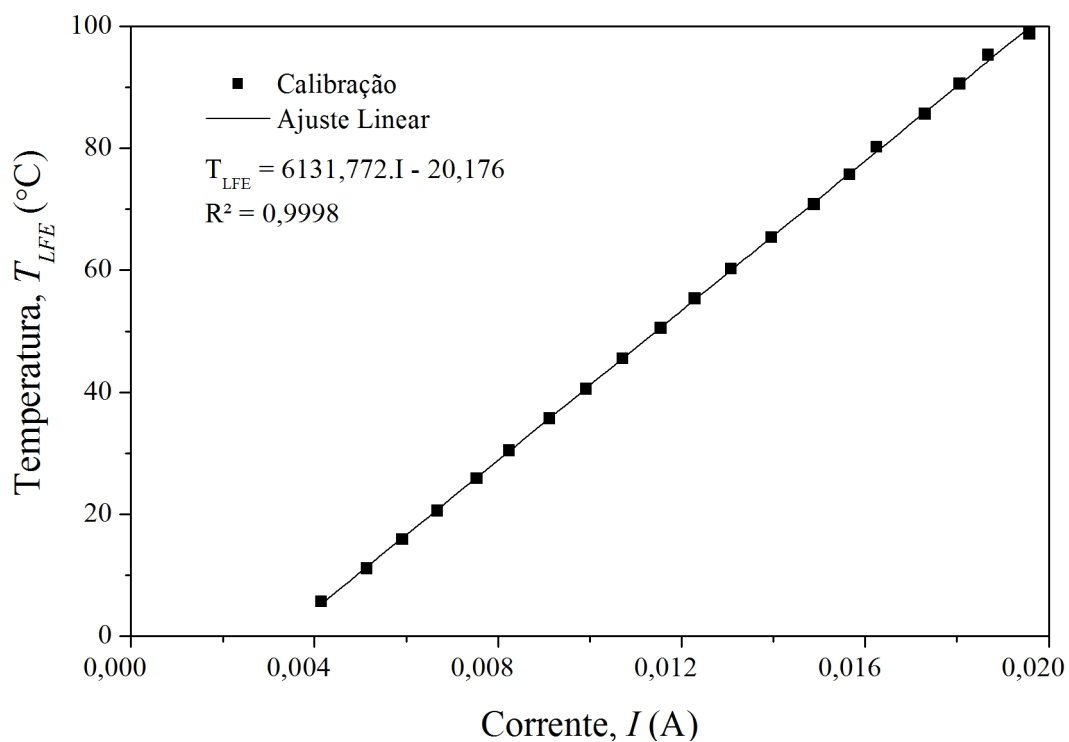


Figura B.6 – Curva de calibração do termopar  $T_{LFE}$ .

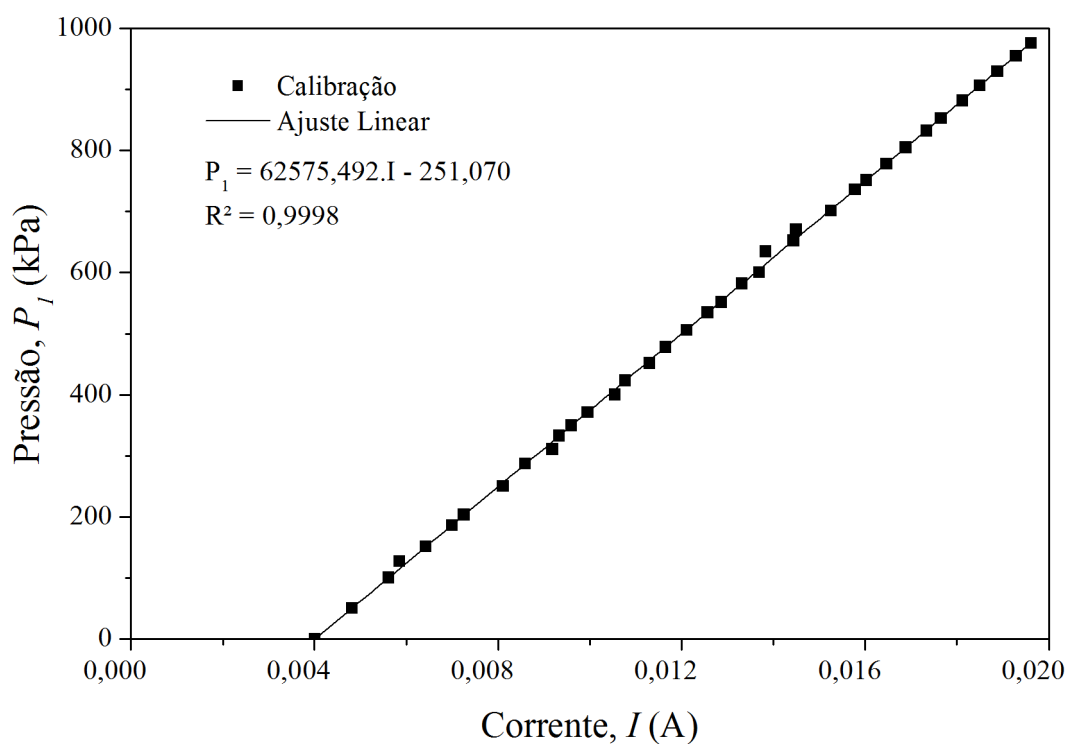


Figura B.7– Curva de calibração do transdutor de pressão  $P_1$ .

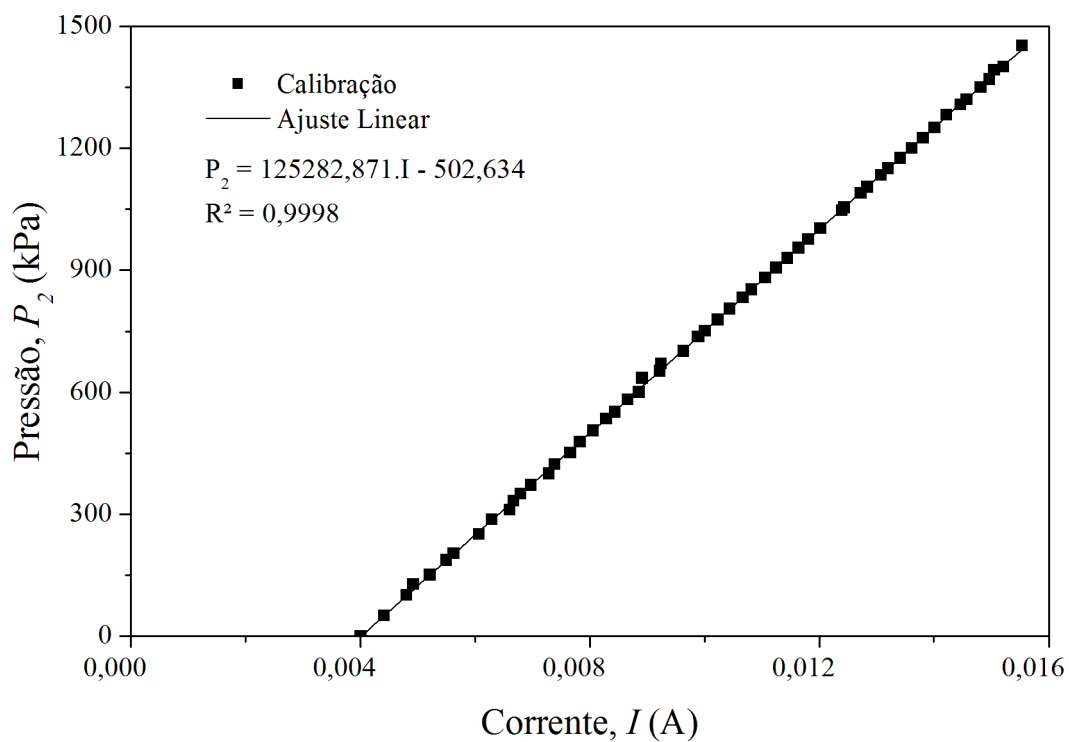


Figura B.8 – Curva de calibração do transdutor de Pressão  $P_2$ .

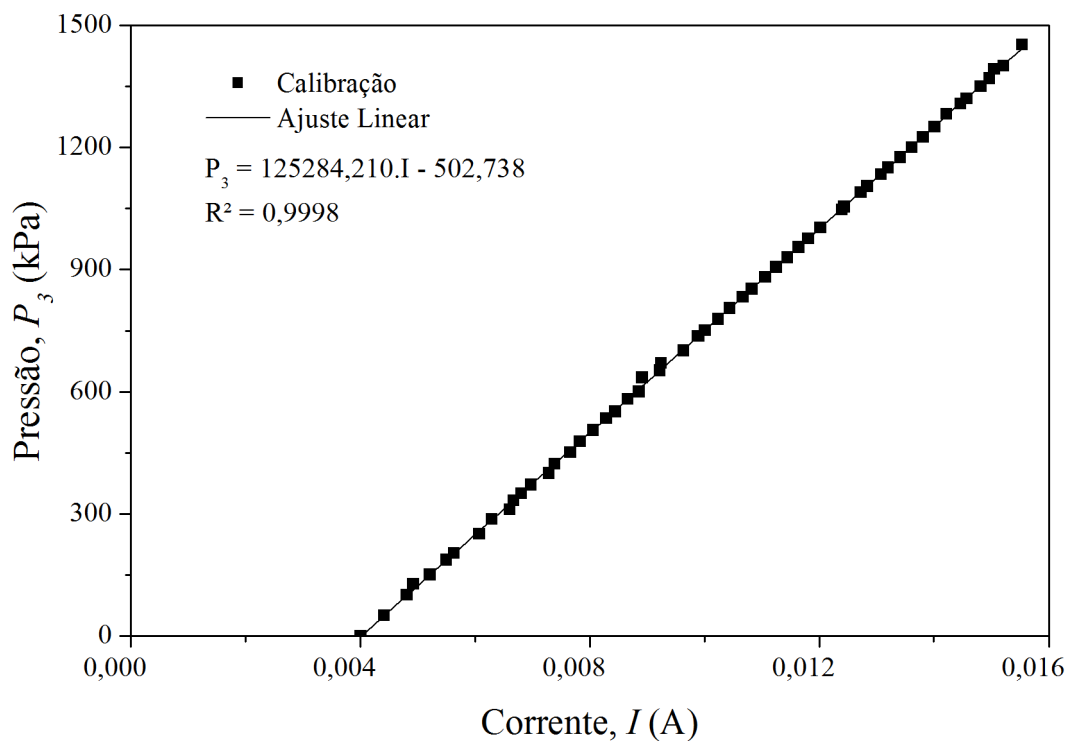


Figura B.9 – Curva de calibração do transdutor de Pressão  $P_3$ .

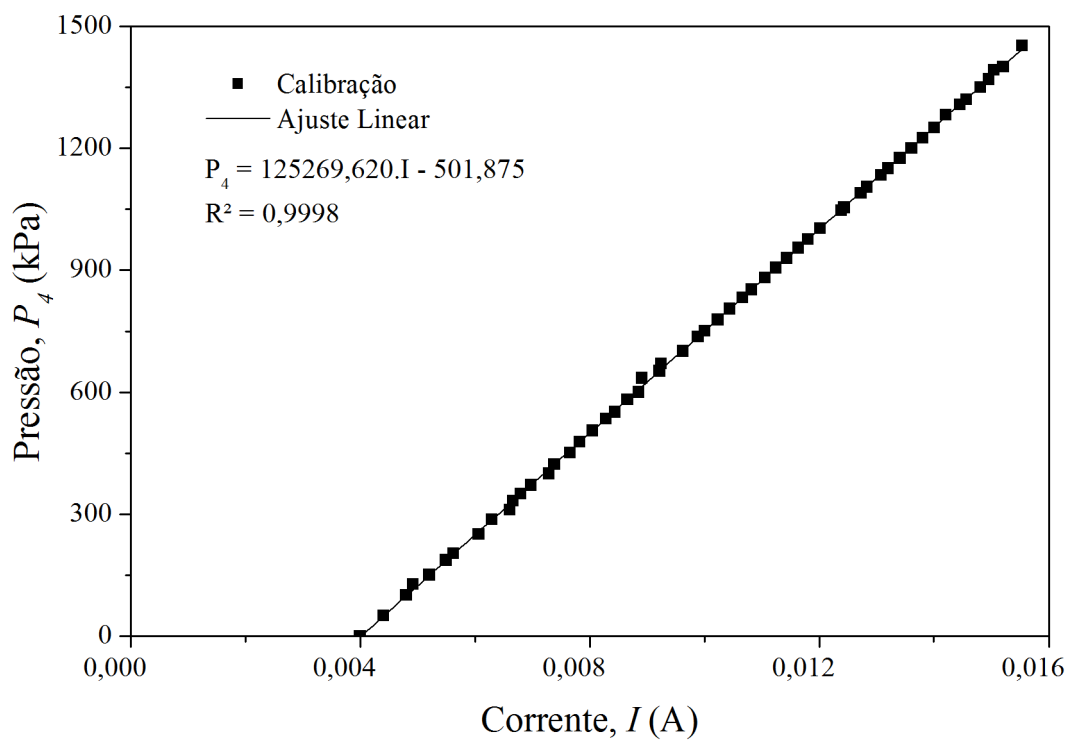


Figura B.10– Curva de calibração do transdutor de Pressão  $P_4$ .

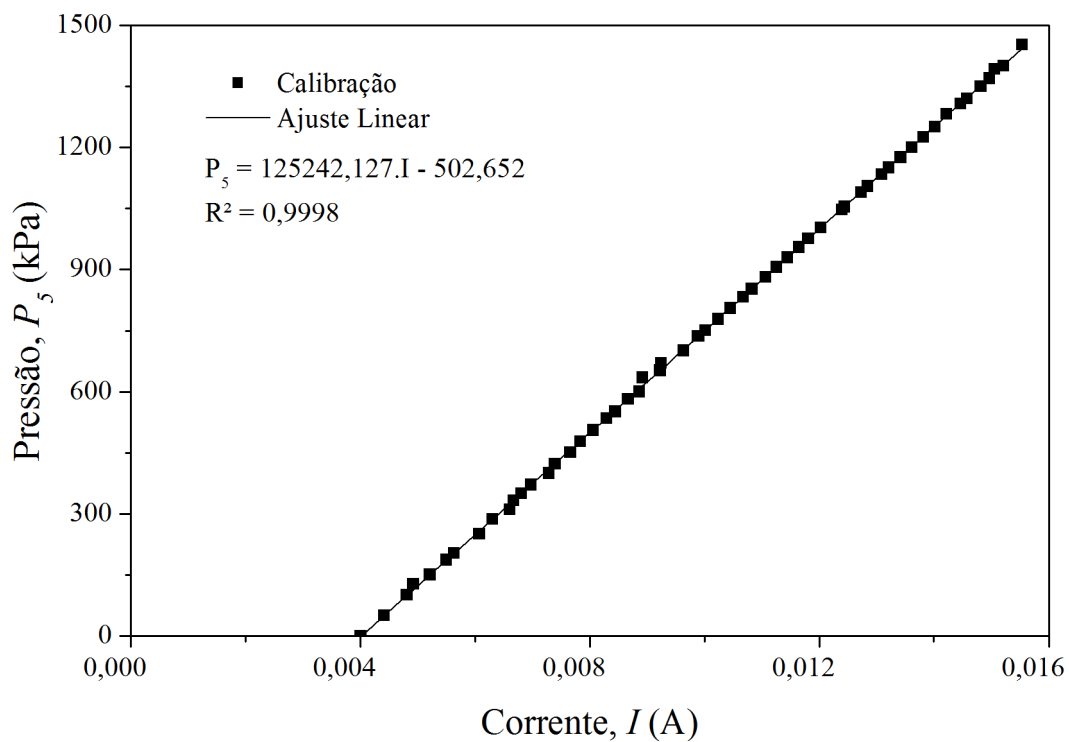


Figura B.11 – Curva de calibração do transdutor de Pressão  $P_5$ .

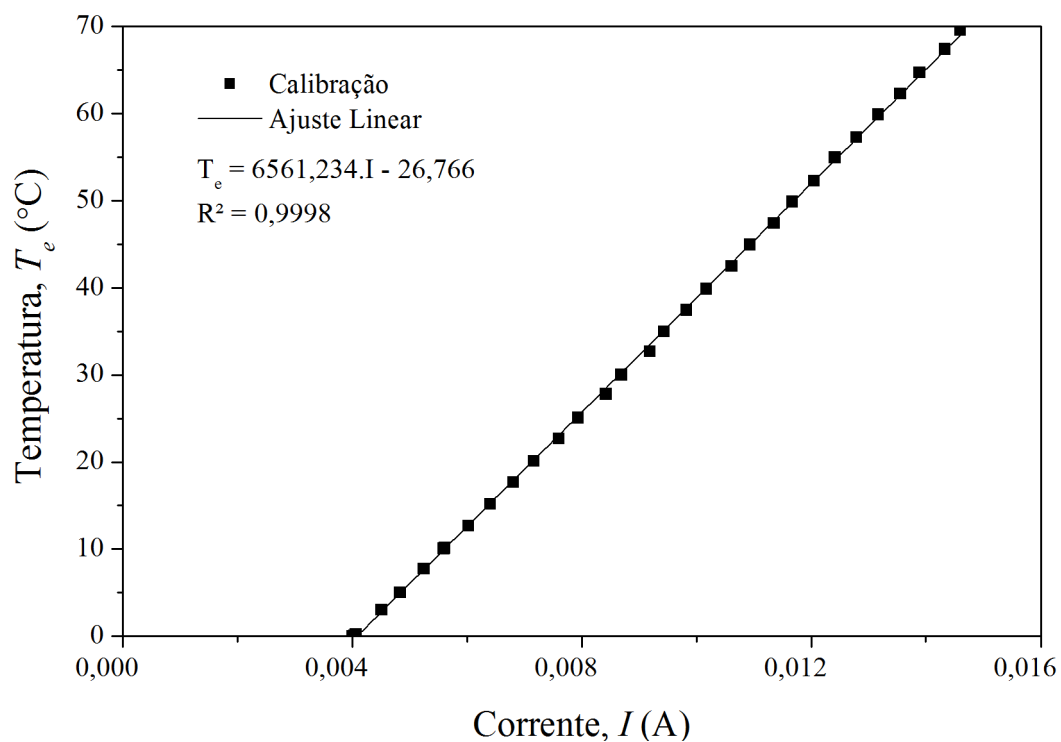


Figura B.12 – Curva de calibração da termoresistência  $T_e$ .



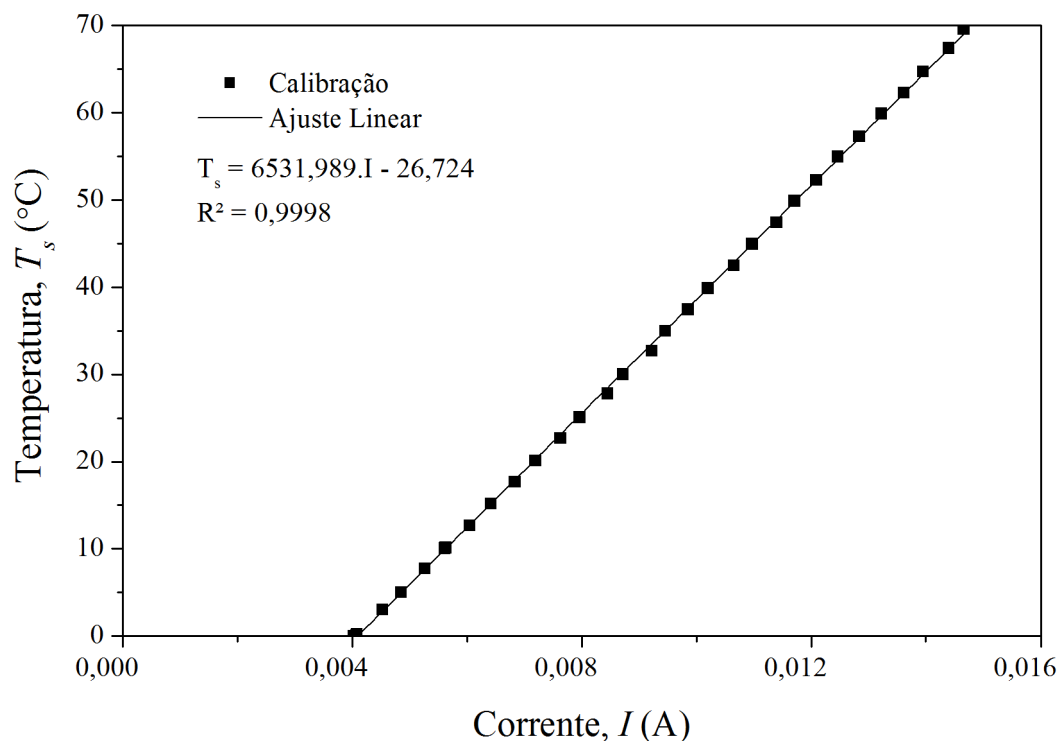


Figura B.13 – Curva de calibração da termoresistência  $T_s$ .

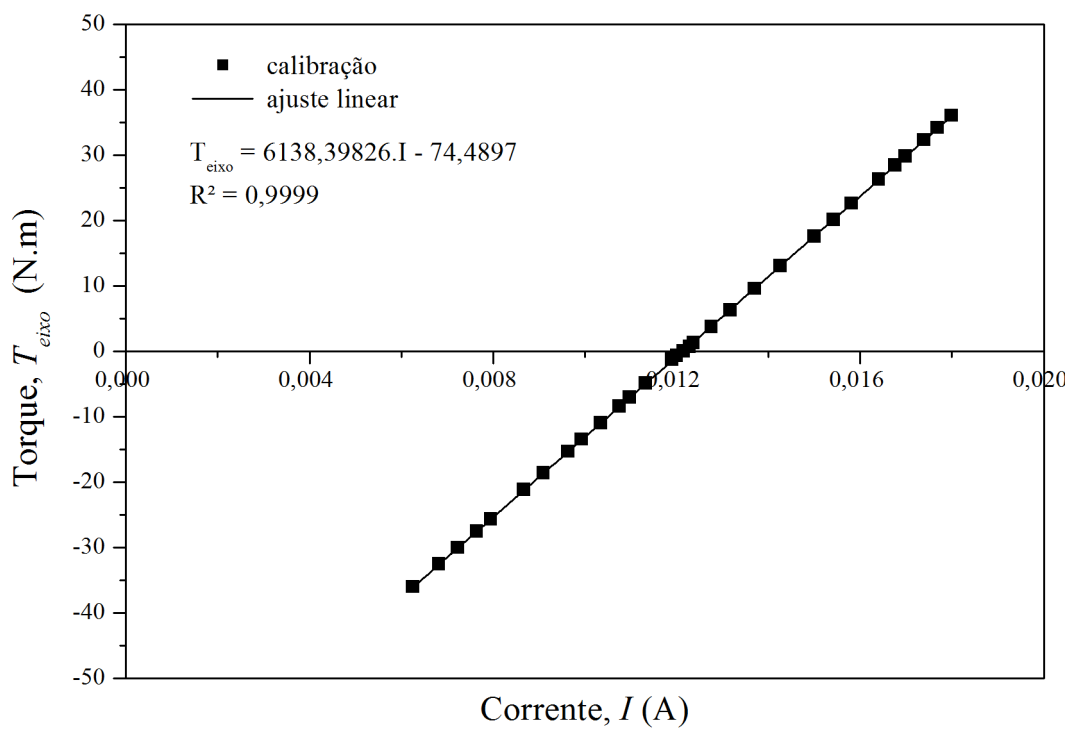


Figura B.14 – Curva de calibração do torquímetro  $T_{eixo}$ .

## APÊNDICE C - ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

A confiabilidade de resultados experimentais está associada ao grau de incerteza dessas variáveis. Para que resultados experimentais sejam confiáveis, é necessário que estejam acompanhados de uma indicação quantitativa sobre seu grau de incerteza. A análise de incerteza é o procedimento utilizado para estimar e expressar essa indicação.

Com base no trabalho de Moffat (1988), este apêndice apresenta a metodologia empregada na análise de incertezas associadas às grandezas utilizadas no estudo do desempenho de BCSs.

### C.1 Análise de Incerteza por Amostragem Simples

As pesquisas experimentais em mecânica dos fluidos, geralmente, são experimentos de amostragem simples, em que cada ponto medido é verificado uma única vez, ou no máximo algumas poucas vezes. A seguir, é descrita a metodologia para a análise das incertezas por amostragem simples.

Seja  $x_i$  uma variável com incerteza conhecida  $\delta x_i$ . Essa variável pode ser expressa por:

$$x_i = x_i(\text{medido}) \pm \delta x_i \quad (\text{C.1})$$

onde a melhor estimativa de  $x_i$  é  $x_i(\text{medido})$ .

A incerteza de  $x_i$  tem 95% de probabilidade de estar entre  $\pm \delta x_i$ . O valor  $x_i(\text{medido})$  representa a medida realizada, enquanto  $\delta x_i$  representa  $2s$ , onde  $s$  é o desvio padrão da população de possíveis medidas, das quais a única amostra  $x_i(\text{medido})$  foi realizada. O desvio padrão da população  $s$  pode ser calculado a partir do desvio padrão da amostra  $S$ , obtido do experimento utilizando-se a distribuição de Student.

O resultado calculado com base em um conjunto de medições pode ser representado por:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{C.2})$$

onde  $R$  é o valor calculados a partir dos valores medidos  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ .

Kline e McClintock (1953) mostraram que a incerteza do resultado calculado  $R$  pode ser estimada utilizando-se uma combinação dos efeitos individuais de cada variável sobre o resultado. Se apenas uma variável com incerteza associada é utilizada no cálculo do resultado  $R$ , a incerteza do resultado calculado devido ao efeito dessa variável é:

$$\delta R_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (\text{C.3})$$

onde  $\partial R / \partial x_i$  é o coeficiente de sensibilidade do resultado  $R$  em relação a variável  $x_i$ .

Quando diversas variáveis independentes são utilizadas no cálculo de  $R$ , as incertezas individuais de cada variável são combinadas da seguinte forma:

$$\delta R = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.4})$$

A Equação (C.4) é válida quando as medições das variáveis são independentes e expressas com a mesma probabilidade. Quando o resultado calculado  $R$  é expresso na forma de produto das variáveis medidas, tal como na Equação (C.5),

$$R = x_1^a \cdot x_2^b \cdot x_3^c \dots x_n^m \quad (\text{C.5})$$

a incerteza da grandeza calculada  $R$  pode ser expressa por:

$$\frac{\delta R}{R} = \left[ \left( a \frac{\delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left( b \frac{\delta x_2}{x_2} \right)^2 + \dots + \left( m \frac{\delta x_n}{x_n} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.6})$$

Considerando-se as incertezas relativas  $u_R$  e  $u_{x_i}$  dadas pelas Equações (C.7) e (C.8), e substituindo-as na Equação (C.6), tem-se uma forma conveniente, Equação (C.9), de se expressar a incerteza da grandeza calculada  $R$  em função das incertezas relativas de cada variável independente  $u_{x_i}$ .

$$\frac{\delta R}{R} = u_R \quad (\text{C.7})$$

$$\frac{\delta x_i}{x_i} = u_{x_i} \quad (\text{C.8})$$

$$u_R = \left[ (a \cdot u_{x_1})^2 + (b \cdot u_{x_2})^2 + \dots + (m \cdot u_{x_n})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.9})$$

As incertezas relativas  $u_R$  e  $u_{x_i}$  representam um valor de incerteza em relação ao valor medido, ou seja, essa incerteza é uma fração do valor medido.

## C.2 Análise das Incertezas

A seguir, é apresentada a análise das incertezas associadas as variáveis utilizadas no cálculo de desempenho de BCSs.

– Altura de elevação ( $H$ ): desconsiderando os termos cinéticos e gravitacionais, a altura de elevação é dada por:

$$H_L = \Delta P \rho_L^{-1} g^{-1} \quad (\text{C.10})$$

Aplicando-se a Equação (C.9) e desprezando-se a incerteza associada à gravidade, a incerteza associada à altura de elevação pode ser calculada por:

$$u_{H_L} = \left[ (u_{\Delta P})^2 + (-u_{\rho_L})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.11})$$

onde  $u_{H_L}$ ,  $u_{\Delta P}$ ,  $u_{\rho_L}$  são as incertezas relativas associadas à altura de elevação, ganho de pressão e massa específica do líquido, respectivamente.

Considerando-se a massa específica  $\rho_L$  como função apenas da temperatura, tem-se  $u_{\rho_L} = u_{T_e}$ . Como o ganho de pressão  $\Delta P$  também representa um valor calculado, sua incerteza pode ser estimada por:

$$\delta_{\Delta P} = \left[ (\delta_{P_s})^2 + (-\delta_{P_e})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.12})$$

– Potência mecânica (BHP): a potência mecânica consumida no acionamento da BCS é calculada por:

$$BHP = \omega T_{eixo} \quad (\text{C.13})$$

A análise da incerteza associada ao cálculo da potência é:

$$u_{BHP} = \left[ (u_{\omega})^2 + (u_{T_{eixo}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.14)$$

onde  $u_{BHP}$ ,  $u_{\omega}$  e  $u_{T_{eixo}}$  são as incertezas relativas associadas à potência mecânica, à rotação e ao torque de eixo, respectivamente.

– Potência hidráulica ( $P_h$ ): desconsiderando as variações de energia cinética e potencial, a potência hidráulica transferida ao fluido pela BCS é calculada por:

$$P_h = \Delta P q_L \quad (C.15)$$

A análise da incerteza associada ao cálculo da potência hidráulica é:

$$u_{P_h} = \left[ (u_{\Delta P})^2 + (u_{q_L})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.16)$$

onde  $u_{P_h}$  e  $u_{q_L}$  são as incertezas relativas associadas a potência hidráulica e a vazão, respectivamente.

– Eficiência ( $\eta$ ): a eficiência energética da BCS é dada por:

$$\eta = \Delta P q_L \omega^{-1} T_{eixo}^{-1} \quad (C.17)$$

A incerteza propagada no cálculo da eficiência da bomba  $u_{\eta}$  é:

$$u_{\eta} = \left[ (u_{\Delta P})^2 + (u_{q_L})^2 + (-u_{\omega})^2 + (-u_{T_{eixo}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.18)$$

– Coeficiente de vazão ( $\Phi$ ): o coeficiente de vazão é calculado por:

$$\Phi = q_L \omega^{-1} D^{-3} \quad (C.19)$$

A incerteza associada ao cálculo do coeficiente de vazão da bomba é:

$$u_{\Phi} = \left[ (u_{q_L})^2 + (-u_{\omega})^2 + (-3u_D)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.20)$$

onde  $u_{\Phi}$  e  $u_D$  são as incertezas associadas ao coeficiente de vazão e ao diâmetro do impelidor, respectivamente.

– Coeficiente de elevação ( $\Psi$ ): o coeficiente de elevação é definido como:

$$\Psi = gH\omega^{-2}D^{-2} \quad (\text{C.21})$$

Desprezando a incerteza associada ao valor da gravidade, a incerteza do cálculo do coeficiente de elevação  $u_\Psi$  é expressa por:

$$u_\Psi = [(u_H)^2 + (-2u_\omega)^2 + (-2u_D)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.22})$$

– Coeficiente de potência ( $\Pi$ ): o coeficiente de potência é definido por:

$$\Pi = BHP\rho_L^{-1}\omega^{-3}D^{-5} \quad (\text{C.23})$$

A incerteza do cálculo do coeficiente de potência  $u_\Pi$  é expressa por:

$$u_\Pi = [(u_{BHP})^2 + (-u_{\rho_L})^2 + (-3u_\omega)^2 + (-5u_D)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.24})$$

– Vazão de mistura ( $q_M$ ): a vazão volumétrica da mistura é definida por:

$$q_M = q_L + q_G \quad (\text{C.25})$$

Aplicando-se a Equação (C.9) a incerteza associada a vazão de mistura é:

$$\delta_{q_M} = [(\delta_{q_L})^2 + (\delta_{q_G})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.26})$$

onde  $\delta_{q_M}$ ,  $\delta_{q_L}$ ,  $\delta_{q_G}$  são as incertezas absolutas associadas a vazões de mistura, líquido e gás, respectivamente.

– Fração homogênea de gás ( $\lambda$ ): a vazão de vazio sem deslizamento ou fração homogênea de gás é definida por:

$$\lambda = \frac{q_G}{q_M} \quad (\text{C.27})$$

A incerteza propagada no cálculo da fração de gás  $u_\lambda$  é dada por:

$$u_\lambda = [(u_{q_G})^2 + (-u_{q_M})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{C.28})$$

### C.3 Incerteza dos Instrumentos de Medição

Neste trabalho, a incerteza dos instrumentos será considerada igual à precisão declarada pelos fabricantes. A precisão dos instrumentos utilizados nas Montagens Experimentais A e B são apresentadas na Tabela C.1 e Tabela C.2, respectivamente. As descrições das variáveis medidas por cada instrumento são apresentadas na Tabela 3.3 e Tabela 4.4.

Tabela C.1 – Precisão dos instrumentos de medição da Montagem Experimental A.

Variável	Incerteza Relativa
$P_1$	$u_{P_1} = \pm 0,075 \%$
$P_2$	$u_{P_2} = \pm 0,075 \%$
$P_{LFE}$	$u_{P_{LFE}} = \pm 0,1 \%$
$\Delta P_{LFE}$	$u_{\Delta P_{LFE}} = \pm 0,1 \%$
$T_e$	$u_{T_e} = \pm 0,5 \%$
$T_{LFE}$	$u_{T_{LFE}} = \pm 0,5 \%$
$\dot{m}_L$	$u_{\dot{m}_L} = \pm 0,20 \%$
$T_{eixo}$	-
$\omega$	$u_{\omega} = \pm 0,05 \%$

Tabela C.2 – Precisão dos instrumentos de medição da Montagem Experimental A.

Variável	Incerteza Relativa
$P_1$	$u_{P_1} = \pm 0,075 \%$
$P_2$	$u_{P_2} = \pm 0,075 \%$
$P_3$	$u_{P_3} = \pm 0,075 \%$
$P_4$	$u_{P_4} = \pm 0,075 \%$
$P_5$	$u_{P_5} = \pm 0,075 \%$
$T_e$	$u_{T_e} = \pm 0,5 \%$
$T_s$	$u_{T_s} = \pm 0,5 \%$
$\dot{m}_L$	$u_{\dot{m}_L} = \pm 0,36 \%$
$\dot{m}_G$	$u_{\dot{m}_G} = \pm 0,05 \%$
$T_{eixo}$	$u_{T_{eixo}} = \pm 0,2 \%$
$\omega$	$u_{\omega} = \pm 0,05 \%$

## APÊNDICE D - MONTAGEM EXPERIMENTAL B

Neste apêndice, são apresentados os detalhes do projeto do *skid* de testes e os equipamentos utilizados na Montagem Experimental B.

Na Figura D.1 e Figura D.2, são apresentadas vistas do projeto do skid construído para os testes de desempenho da BCS GN5200. Na Figura D.3, são apresentados detalhes do projeto do *skid* de testes.

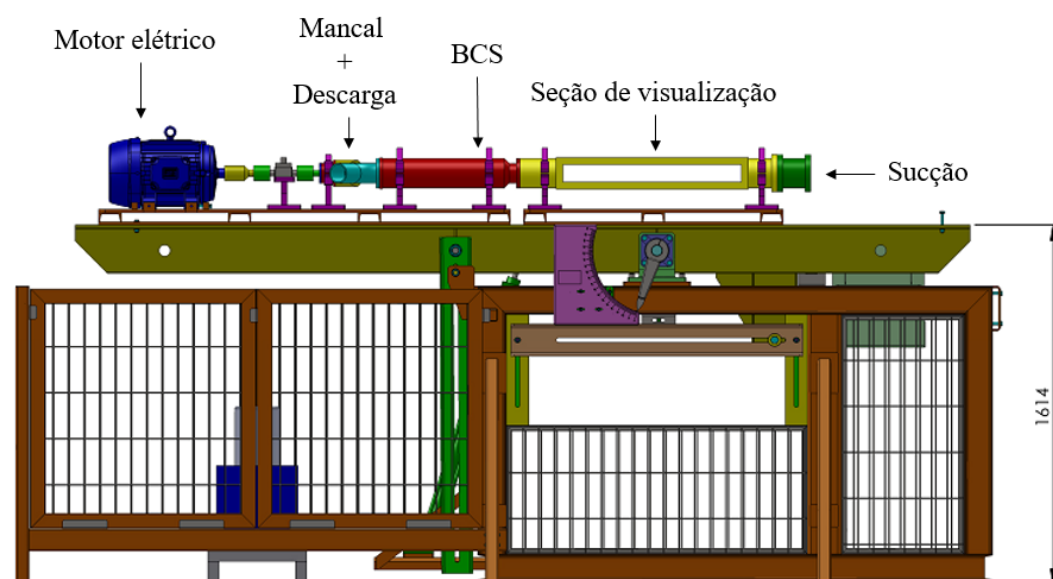


Figura D.1 – Vista lateral do skid de testes de BCSs.

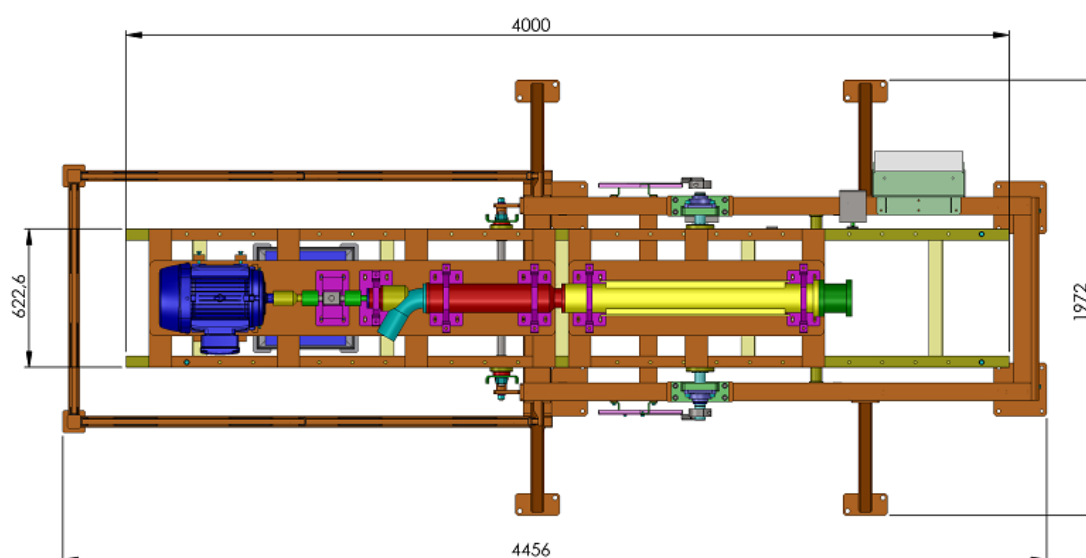


Figura D.2 – Vista superior do skid de testes de BCSs.



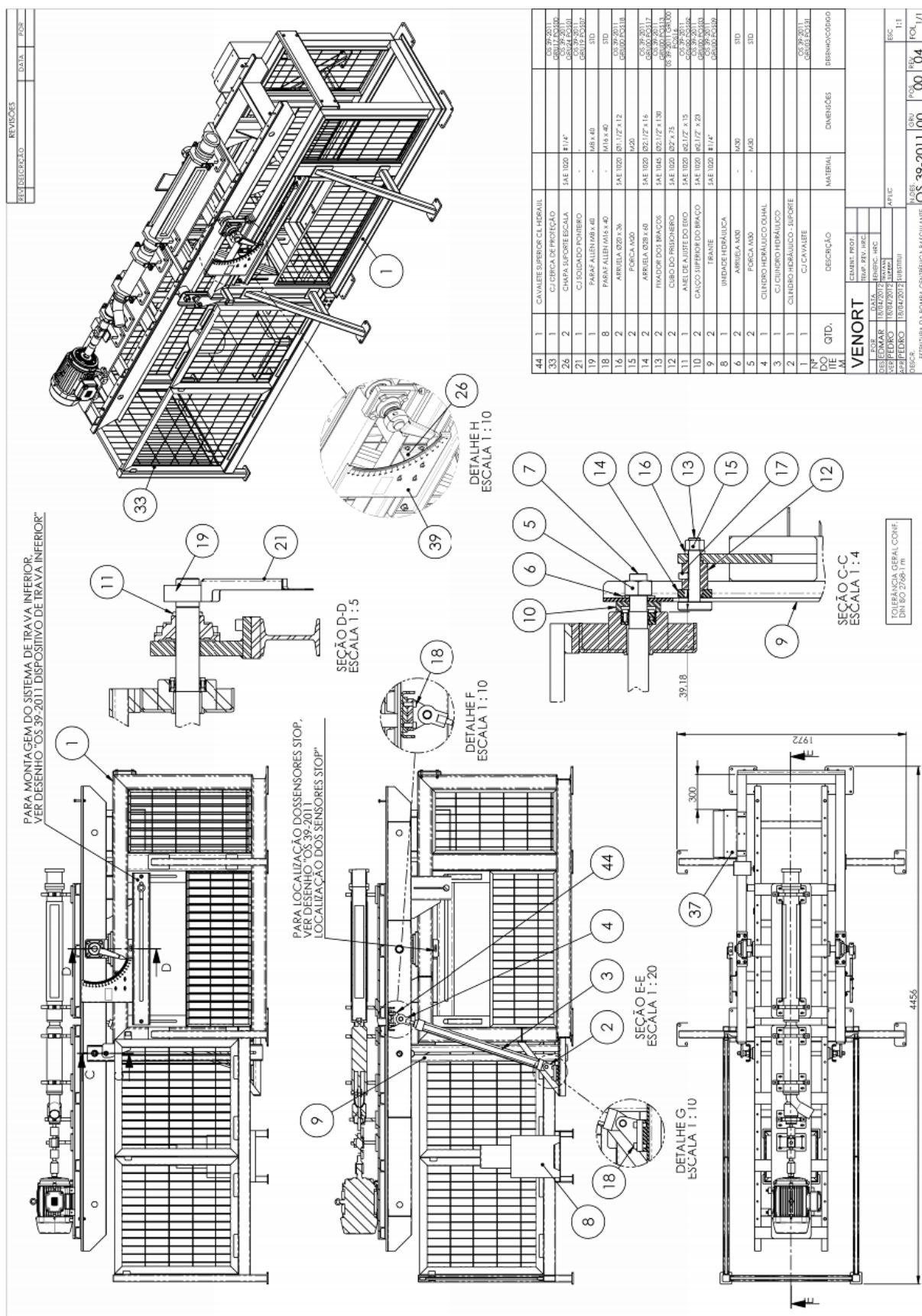


Figura D.3 – Detalhes do projeto do *skid* de testes de BCSs.

Na Figura D.4, é apresentado o *skid* de testes de BCS montado na posição horizontal. Na Figura D.5, é mostrada BCS GN5200 instrumentada e isolada termicamente. Na Figura D.6, é mostrada a estrutura do circuito de testes com os tanques, bombas *boosters* e trocador de calor.



Figura D.4 – Vista geral do *skid* de testes na posição horizontal.

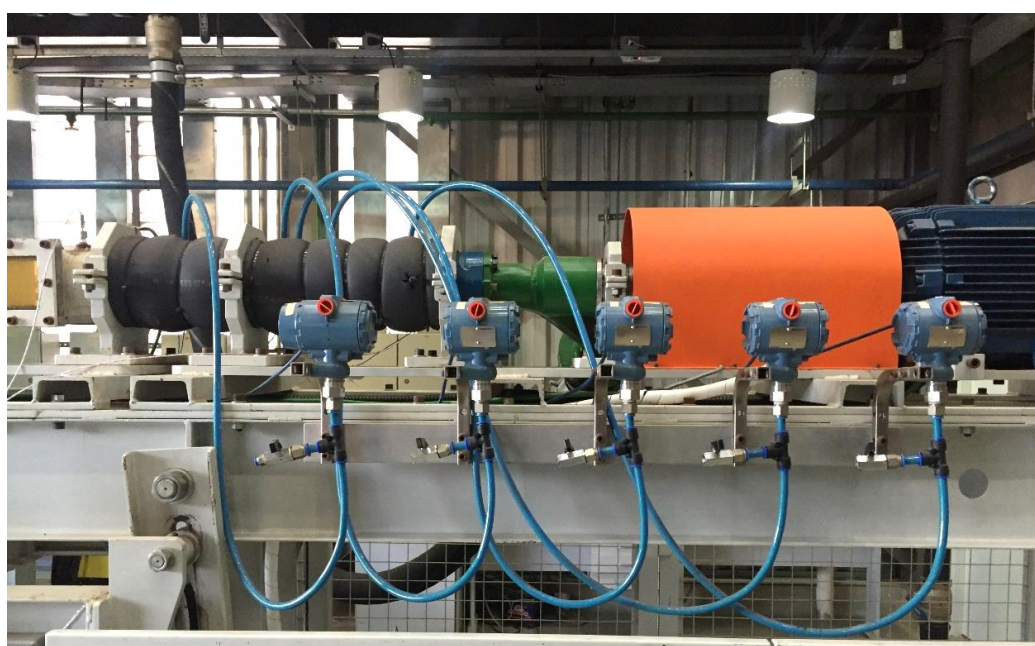


Figura D.5 – BCS GN5200 instrumentada.



Figura D.6 – Estrutura do circuito de testes.



## ANEXO I - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste anexo são apresentados os valores medidos em cada um dos testes realizados nas Montagens Experimentais A e B.

### I.1 Resultados Medidos na Montagem Experimental A

Tabela I.1 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 600 \text{ rpm}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
59,128	59,246	3445,25	22,3
61,121	62,254	3167,48	22,4
56,890	58,443	3061,09	22,4
58,499	60,836	2811,49	22,4
59,932	62,884	2584,74	22,4
57,677	61,047	2378,50	22,5
58,501	62,317	2206,29	22,5
49,446	53,680	2023,49	22,5
50,437	55,049	1800,87	22,5
51,253	56,198	1621,24	22,6
51,974	57,218	1420,61	22,6
52,688	58,091	1230,78	22,7
43,424	49,041	1024,96	22,7
43,952	49,646	831,24	22,7
44,482	50,284	577,08	22,8
44,927	50,809	338,64	22,8
45,099	50,959	231,28	22,9
45,267	51,084	65,63	23,0

Tabela I.2 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
49,835	50,084	5292,37	22,8
52,767	54,550	5030,10	22,8
55,081	57,974	4816,62	22,8
57,060	61,079	4611,64	23,0
59,487	64,694	4362,27	23,0
58,641	64,617	4190,49	23,1
45,913	52,376	4068,15	23,1
48,210	55,580	3806,47	23,1
49,689	57,706	3625,27	23,1
51,583	60,459	3377,14	23,1
52,939	62,270	3204,81	23,2
54,182	64,075	3015,89	23,2

55,626	66,211	2785,33	23,2
51,257	62,255	2630,29	23,2
52,513	64,121	2400,35	23,2
44,705	56,726	2210,22	23,2
45,726	58,143	2000,66	23,3
46,704	59,331	1791,02	23,3
47,450	60,138	1606,83	23,3
48,310	61,097	1400,16	23,4
48,892	61,901	1196,96	23,4
49,501	62,553	989,67	23,4
50,144	63,315	774,64	23,4
50,393	63,737	593,88	23,4
50,729	64,132	423,83	23,5
51,045	64,528	238,43	23,5
51,220	64,760	99,76	23,5

Tabela I.3 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
34,342	34,604	7141,54	24,1
36,539	37,933	6996,74	24,2
39,943	43,120	6766,07	24,2
43,967	49,213	6486,08	24,3
47,233	54,091	6250,19	24,3
50,330	58,828	6012,59	24,3
53,707	63,753	5751,16	24,4
56,687	68,028	5503,75	24,4
59,693	72,316	5245,09	24,4
62,769	76,574	4968,20	24,4
53,190	67,781	4734,76	24,4
55,247	70,664	4532,00	24,5
58,031	74,620	4238,78	24,5
51,232	68,645	4036,04	24,5
53,542	72,006	3765,43	24,5
55,799	75,286	3481,80	24,5
57,669	77,949	3225,92	24,5
59,204	80,076	3010,36	24,6
60,883	82,533	2746,71	24,6
50,043	72,187	2509,84	24,6
51,352	74,042	2248,85	24,6
52,671	75,655	1997,89	24,6
48,277	71,449	1720,29	24,7
48,957	72,283	1537,66	24,7
50,002	73,549	1249,82	24,7
50,722	74,418	1003,14	24,7
51,368	75,205	766,04	24,7
51,883	75,823	526,32	24,8
52,272	76,328	293,16	24,8
52,507	76,771	109,02	23,6

Tabela I.4 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 1500 \text{ rpm}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
55,595	55,709	8963,61	26,8
60,120	62,587	8720,29	26,8
53,088	58,492	8418,77	26,9
56,087	62,960	8252,52	26,9
50,434	59,537	8010,46	26,9
55,056	66,412	7740,58	27,0
58,404	71,483	7531,29	27,0
51,770	66,906	7271,60	27,0
55,807	72,947	7007,38	27,0
60,161	79,329	6711,09	27,1
63,063	83,473	6501,95	27,1
57,900	79,722	6253,31	27,1
61,787	84,512	5957,34	27,2
64,802	88,673	5717,29	27,2
67,541	92,526	5490,23	27,2
59,070	85,210	5261,22	27,3
62,810	90,665	4918,18	27,3
64,502	93,133	4754,28	27,3
60,867	90,542	4520,12	27,3
61,430	92,290	4239,14	27,3
57,774	89,706	3971,06	27,4
59,705	92,460	3740,39	27,4
61,729	95,316	3498,13	27,4
63,692	98,034	3241,09	27,4
62,945	97,921	3005,98	27,4
53,211	88,758	2739,55	27,4
54,714	90,574	2485,27	27,4
55,999	92,029	2247,26	27,4
37,698	73,928	1994,63	27,4
38,774	75,223	1753,71	27,4
39,837	76,566	1477,91	27,4
40,539	77,467	1266,26	27,4
41,449	78,491	984,52	27,4
41,971	79,190	786,61	27,4
42,367	79,705	565,94	27,4
42,654	80,087	390,58	27,4
42,980	80,629	147,60	27,4

Tabela I.5 – Teste bifásico água-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,052	50,593	272,673	0,246	5250,16	21,2	26,0
50,229	53,302	271,655	0,245	4818,73	21,3	26,0

49,954	54,533	270,282	0,245	4517,18	21,5	26,0
50,005	55,913	267,886	0,246	4192,60	21,8	26,0
50,147	57,407	271,457	0,247	3778,52	22,0	26,0
50,034	58,428	272,909	0,247	3421,69	22,2	26,0
50,147	59,465	269,210	0,246	3081,83	22,4	26,0
50,233	59,636	267,452	0,246	2780,97	22,5	25,9
49,999	59,195	272,175	0,248	2327,95	22,7	25,9
49,993	55,418	273,036	0,248	1634,56	22,8	25,9
49,326	50,303	270,060	0,247	872,25	23,0	25,9

Tabela I.6 – Teste bifásico água-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,923	50,342	265,159	0,497	5240,91	23,6	25,5
50,044	52,512	264,462	0,497	4882,19	23,7	25,5
50,294	54,462	263,577	0,497	4544,47	23,8	25,4
50,037	55,741	268,076	0,497	4161,86	23,9	25,3
49,893	57,071	269,975	0,499	3687,30	24,0	25,2
50,326	58,436	265,482	0,497	3378,71	24,2	25,1
50,186	58,801	268,196	0,499	3096,65	24,3	24,9
50,397	58,745	268,109	0,498	2724,96	24,5	24,9
50,042	57,326	265,112	0,496	2367,56	24,6	24,9
50,669	55,150	269,529	0,500	1920,58	24,7	24,8
49,991	50,940	266,466	0,500	1201,20	24,9	24,8

Tabela I.7 – Teste bifásico água-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,973	50,786	276,812	0,718	5131,64	21,8	24,5
50,047	52,452	275,093	0,721	4807,19	22,2	24,8
50,297	54,129	274,083	0,722	4540,24	22,3	24,9
50,248	55,450	276,828	0,725	4236,36	22,7	25,1
50,160	56,536	275,443	0,735	3878,14	23,2	25,4
50,177	57,502	277,420	0,731	3521,77	23,3	25,4
49,972	57,864	277,680	0,734	3163,27	24,0	25,7
50,145	56,929	274,987	0,735	2711,64	24,0	25,7
50,201	54,947	273,204	0,735	2459,78	24,1	25,8
50,473	53,787	270,407	0,735	2251,70	24,2	25,9
50,185	51,733	276,816	0,738	1808,10	24,4	26,0

Tabela I.8 – Teste bifásico água-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e

$$\dot{m}_G = 0,100 \text{ kg/h.}$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,167	50,696	265,690	1,012	5119,46	19,7	27,2
50,354	52,339	264,604	0,995	4856,24	20,0	27,7
50,215	53,611	261,687	0,995	4550,21	20,2	27,8
50,207	54,929	260,689	1,024	4212,30	20,3	27,9
50,146	56,252	267,135	1,026	3759,90	20,4	28,0
49,968	56,941	271,124	0,976	3454,94	20,6	28,2
50,024	57,252	267,844	0,977	3130,00	20,7	28,2
50,090	55,415	264,111	1,015	2747,37	20,8	28,3
50,244	53,923	263,028	1,030	2528,68	21,1	28,6
50,222	52,845	268,773	0,997	2295,81	21,4	28,7

Tabela I.9 – Teste bifásico água-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e

$$\dot{m}_G = 0,125 \text{ kg/h.}$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,196	51,076	266,124	1,261	5040,81	22,6	29,5
50,609	52,758	269,246	1,244	4778,07	22,8	29,5
50,096	53,509	267,147	1,243	4417,97	23,0	29,5
49,950	54,293	263,471	1,264	4146,44	23,1	29,6
49,942	55,386	261,900	1,264	3760,06	23,2	29,5
50,080	55,859	260,483	1,265	3484,44	23,2	29,5
50,537	56,228	265,821	1,267	3231,46	23,3	29,5
50,219	55,255	269,546	1,245	3012,63	23,4	29,5
50,415	52,781	268,012	1,242	2578,90	23,5	29,5

Tabela I.10 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 =$ 

$$150 \text{ kPa}, \dot{m}_{L,0,8,BEP} = 2560 \text{ kg/h.}$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,123	61,017	291,293	0,000	2547,19	27,9	33,3
49,858	59,943	291,293	0,082	2559,83	28,1	33,6
49,912	59,458	287,317	0,166	2544,31	28,2	33,8
49,878	58,826	283,794	0,260	2534,95	28,4	34,1
50,069	58,301	281,177	0,359	2518,68	28,5	34,2
49,857	57,535	283,385	0,463	2549,31	28,7	34,5
50,093	56,873	281,571	0,587	2520,18	29,6	36,2
49,760	55,711	282,420	0,673	2578,48	29,6	36,2
50,118	54,459	281,133	0,812	2512,74	29,6	36,2
49,965	53,727	276,669	0,937	2530,29	29,7	36,3



49,809	52,899	273,074	1,203	2557,89	29,8	36,3
49,973	52,178	271,029	1,407	2528,33	29,9	36,3

Tabela I.11 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 3200 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,827	59,218	277,220	0,000	3247,75	26,5	30,0
50,102	59,337	273,437	0,104	3183,60	26,6	30,3
49,800	58,846	276,682	0,215	3212,36	26,7	30,4
49,968	58,916	277,218	0,318	3187,70	26,7	30,6
50,153	58,871	276,207	0,421	3193,65	26,8	30,8
50,038	58,362	272,905	0,542	3224,31	26,9	31,0
50,158	58,202	270,758	0,652	3206,66	26,9	31,2
50,252	58,143	270,029	0,727	3200,76	27,0	31,4
50,099	57,508	267,355	0,902	3201,32	27,1	31,7
50,212	57,265	266,293	1,002	3186,46	27,2	31,9
50,281	56,892	270,545	1,066	3186,69	27,3	32,1
50,044	55,972	270,712	1,182	3212,30	27,4	32,3
50,246	55,420	265,612	1,312	3182,06	27,7	32,8
50,273	54,265	263,070	1,541	3184,57	27,9	33,0
50,036	53,320	265,162	1,673	3194,09	28,0	33,2
50,248	52,657	278,143	1,791	3168,21	28,1	33,2
50,171	51,974	277,246	1,908	3184,36	28,2	33,3
49,745	51,284	273,446	1,997	3246,00	28,3	33,4
50,115	50,538	270,246	2,307	3196,83	28,3	33,5

Tabela I.12 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 3840 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,224	57,203	287,367	0,000	3841,30	29,1	34,9
50,094	56,868	284,004	0,087	3843,08	29,2	35,1
50,334	57,152	281,167	0,206	3857,06	29,3	35,2
50,457	57,087	278,759	0,394	3843,18	29,3	35,3
50,349	56,883	282,382	0,524	3849,14	29,4	35,4
50,474	56,797	282,825	0,644	3830,12	29,5	35,4
50,384	56,473	281,158	0,777	3838,18	29,6	35,5
50,551	56,252	274,767	0,981	3820,07	30,1	35,9
50,369	55,686	277,423	1,147	3840,63	30,2	35,9
50,161	55,066	277,815	1,276	3860,81	30,3	36,0
50,395	54,832	273,266	1,459	3829,18	30,3	36,0
49,942	53,463	270,366	1,688	3848,33	30,4	36,1
50,171	53,031	272,320	1,863	3815,17	30,8	36,5
49,913	51,709	270,010	2,150	3821,24	30,9	36,7
49,275	50,129	265,970	2,407	3848,34	31,0	36,7

49,317	49,511	263,748	2,641	3834,94	31,1	36,8
--------	--------	---------	-------	---------	------	------

Tabela I.13 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 3200 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,856	59,166	218,258	0,000	3196,28	26,2	31,3
49,808	58,777	213,722	0,159	3180,03	26,4	31,4
49,908	58,828	211,087	0,308	3206,82	26,5	31,5
50,075	58,850	209,027	0,473	3183,53	26,6	31,6
49,876	58,050	207,243	0,658	3206,01	26,7	31,7
49,969	57,939	205,998	0,799	3189,89	26,7	31,8
50,111	57,527	204,321	0,973	3163,04	26,8	31,9
50,271	57,115	209,677	1,114	3144,86	26,9	32,0
49,995	56,335	206,473	1,283	3182,38	27,0	32,0
49,862	55,237	204,246	1,479	3193,11	27,1	32,1
49,548	54,248	202,388	1,653	3265,77	27,2	32,2
49,825	53,360	200,342	1,885	3231,79	27,3	32,2
50,040	52,761	198,705	2,066	3206,38	27,4	32,2
50,154	52,347	203,809	2,200	3182,62	27,5	32,3
50,113	51,848	198,147	2,384	3194,07	27,7	32,4
50,472	51,637	209,883	2,453	3157,70	27,8	32,5
50,368	51,181	211,773	2,582	3158,93	28,1	32,5

Tabela I.14 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 4260 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,994	66,431	223,338	0,000	4273,56	25,1	25,8
49,656	66,020	219,910	0,194	4261,97	25,4	26,2
50,103	66,128	217,394	0,401	4248,34	25,8	26,8
50,051	65,741	216,053	0,607	4255,23	25,8	26,9
49,869	65,036	214,393	0,836	4266,63	25,9	27,1
50,237	65,079	219,821	1,028	4249,13	26,0	27,3
49,943	64,246	243,146	1,136	4273,77	26,1	27,5
50,090	63,864	240,455	1,353	4255,74	26,1	27,6
50,088	63,021	275,923	1,398	4263,81	26,2	27,8
50,018	62,112	272,750	1,586	4268,57	26,2	27,9
50,046	61,184	270,076	1,785	4265,70	26,3	28,1
50,076	60,175	268,024	1,985	4264,66	26,4	28,2
50,008	58,732	265,747	2,188	4264,99	26,5	28,5
50,177	57,596	263,353	2,402	4251,61	26,5	28,6
50,126	56,436	268,020	2,556	4250,36	26,6	28,8
50,150	55,111	279,485	2,641	4249,29	26,7	28,9
50,411	54,586	271,164	2,905	4230,11	27,0	29,6

Tabela I.15 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 1500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 5330 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,925	75,984	308,137	0,000	5328,04	27,3	30,0
50,017	75,715	268,800	0,209	5324,25	27,4	30,2
49,988	75,527	266,716	0,429	5311,50	27,5	30,3
49,809	74,900	264,908	0,678	5325,79	27,6	30,4
49,726	74,335	263,252	0,908	5328,11	27,6	30,4
49,826	73,800	261,545	1,122	5327,82	27,7	30,5
49,943	73,165	260,051	1,355	5313,63	27,8	30,6
50,047	72,436	263,504	1,579	5301,86	27,9	30,8
50,120	71,743	261,449	1,810	5298,22	28,0	30,9
49,858	70,411	258,713	2,077	5319,81	28,1	31,0
49,928	69,398	256,879	2,326	5312,94	28,2	31,1
50,059	68,201	254,972	2,579	5298,70	28,3	31,1
50,062	66,803	266,664	2,704	5301,10	28,4	31,2
49,787	64,597	266,828	2,942	5318,29	28,5	31,3
50,731	63,188	260,630	3,261	5246,09	28,6	31,4
50,089	60,557	256,381	3,588	5292,27	28,7	31,5
49,621	58,916	244,750	3,935	5332,86	28,8	31,5

Tabela I.16 – Teste de desempenho monofásico com solução de água e isopropanol, Fluido 1,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
55,2	55,2	5057,118	10,1
55,286	56,40888	4972,833	10,1
57,089	59,3234	4762,119	10,1
55,088	58,37638	4509,263	10,2
63,046	67,33066	4298,55	10,2
62,096	67,31918	4087,837	10,2
66,587	72,69108	3877,124	10,3
67,087	74,01462	3666,41	10,3
70,098	77,79221	3455,697	10,3
53,287	61,69144	3244,984	10,3
54,587	63,64602	3034,271	10,3
54,987	64,64582	2781,415	10,3
57,985	68,18986	2612,844	10,3
60,987	71,68531	2402,131	10,3
60,845	71,98549	2191,418	10,3
61,287	72,81989	2022,847	10,3
63,574	75,45111	1769,991	10,4
59,587	71,76193	1559,278	10,4
60,874	73,30228	1348,565	10,4
61,087	73,72623	1137,852	10,4
62,874	75,68401	927,1383	10,5

62,897	75,83998	758,5677	10,5
62,985	76,02568	505,7118	10,5
60,874	73,97978	294,9985	10,6
57,598	70,74556	0	10,6

Tabela I.17 – Teste de desempenho monofásico com solução de água e isopropanol, Fluido 2,  
 $\omega = 900 \text{ rpm}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
53,282	53,874	5020,54	10,1
55,198	56,696	4858,65	10,1
58,683	61,746	4556,01	10,1
60,938	65,034	4334,04	10,2
63,127	68,289	4121,71	10,2
62,808	69,056	3849,77	10,2
66,053	73,556	3496,86	10,3
68,355	76,826	3215,88	10,3
70,686	79,973	2923,43	10,3
69,445	79,636	2646,18	9,7
73,318	84,752	2033,36	9,6
66,174	78,067	1793,43	9,4
58,982	71,239	1530,90	9,8
60,183	72,893	1233,60	9,7
60,922	73,652	1014,65	9,7
61,600	74,388	842,78	9,7
61,889	74,767	668,92	9,6
62,353	75,317	492,85	9,7
62,760	75,812	334,63	9,7
63,010	76,255	100,16	9,6

Tabela I.18 – Teste de desempenho monofásico com solução de água e isopropanol, Fluido 3,  
 $\omega = 900 \text{ rpm}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
50,830	51,257	5029,93	13,6
54,204	56,267	4736,58	13,8
56,425	59,561	4535,40	13,8
60,191	64,877	4189,44	13,7
62,986	68,912	3904,10	13,7
66,394	73,696	3534,66	13,7
70,342	79,160	3061,09	13,6
73,400	83,457	2635,46	13,4
75,238	85,868	2366,38	13,2
61,189	72,627	1987,73	13,2
63,038	75,163	1622,67	13,2
64,285	76,741	1360,13	13,1

65,081	77,771	1109,12	13,0
66,165	78,889	821,74	12,9
60,921	73,753	670,22	12,8
61,482	74,432	436,98	12,7
62,123	75,161	190,53	12,6
62,050	75,249	92,42	12,6

Tabela I.19 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 1-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,091	50,190	232,925	0,275	5164,88	10,2	25,9
50,224	51,838	231,381	0,275	4886,65	9,6	26,0
50,108	53,332	229,732	0,275	4571,83	9,8	26,0
50,224	55,684	233,248	0,275	4160,14	9,2	26,1
50,311	57,765	231,507	0,275	3556,88	9,8	26,1
50,044	59,067	229,869	0,275	3036,48	10,1	26,2
49,832	59,869	228,707	0,275	2580,12	9,7	26,2
50,069	60,637	232,959	0,277	2124,46	10,0	26,3
50,018	60,838	232,035	0,275	1527,35	10,3	26,4

Tabela I.20 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 1-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,375	50,682	226,462	0,556	5136,55	9,6	26,5
50,052	52,490	231,608	0,557	4789,30	9,7	26,5
50,134	54,901	228,105	0,556	4306,15	10,1	26,5
50,250	56,863	230,561	0,563	3780,44	9,8	26,6
49,937	57,992	226,634	0,557	3290,64	10,1	26,7
49,907	59,236	231,382	0,559	2758,37	9,6	26,8
49,847	59,683	230,921	0,558	2347,54	9,8	26,9
50,027	60,150	228,074	0,557	2025,04	10,1	26,9
49,890	59,567	228,731	0,558	1653,11	9,9	27,0
50,049	56,045	226,746	0,559	1341,94	10,1	27,0

Tabela I.21 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 1-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,293	50,416	224,542	0,846	5155,18	9,2	27,8
50,107	51,981	222,931	0,846	4854,18	9,8	28,0
50,000	53,709	224,931	0,847	4501,10	10,1	28,2

49,828	55,005	223,699	0,847	4171,99	9,6	28,3
50,255	56,891	227,607	0,853	3678,22	9,9	28,3
50,122	58,135	228,820	0,850	3204,00	9,3	28,3
49,943	58,979	224,087	0,848	2715,59	9,6	28,3
49,908	59,035	226,244	0,859	2247,86	10,0	28,3
50,216	56,601	222,696	0,850	1919,65	9,9	28,5
49,861	54,449	228,777	0,852	1630,26	10,1	28,5
50,083	54,526	224,457	0,850	1382,59	10,5	28,5

Tabela I.22 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 1-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,100 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,284	50,405	222,778	1,198	5164,42	9,5	28,5
50,484	52,904	221,998	1,148	4764,27	9,8	28,6
50,140	54,820	221,153	1,148	4292,85	10,0	28,6
50,078	56,240	226,291	1,150	3850,32	9,7	28,6
50,208	57,595	226,291	1,149	3408,00	9,8	28,6
49,894	58,423	223,769	1,149	2800,50	10,1	28,6
50,246	58,204	223,924	1,149	2385,86	9,7	28,5
50,006	55,614	222,659	1,149	2041,84	9,8	28,4
49,883	53,774	221,229	1,148	1708,93	10,2	28,4
49,952	53,053	226,874	1,150	1486,65	10,0	28,4

Tabela I.23 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 1-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,125 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,468	50,566	218,237	1,442	5105,76	9,7	27,1
49,977	52,623	220,209	1,447	4651,91	9,8	27,6
50,283	55,013	219,107	1,448	4189,05	9,4	27,8
49,982	55,973	218,480	1,449	3820,20	9,6	27,9
49,771	56,995	221,464	1,421	3315,48	9,5	28,2
49,930	57,745	219,638	1,431	2991,40	9,9	28,3
50,134	57,391	222,550	1,434	2613,32	9,5	28,3
50,228	56,323	222,111	1,435	2355,07	9,9	28,4
49,757	53,884	219,934	1,435	2039,18	9,6	28,5

Tabela I.24 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 2-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,562	50,626	226,083	0,279	5093,06	9,9	30,6

50,417	52,165	223,331	0,279	4782,42	9,7	30,7
49,825	53,218	230,323	0,281	4476,99	9,9	30,7
49,848	54,737	228,492	0,280	4153,38	9,4	30,8
50,171	56,553	224,401	0,279	3784,43	9,6	30,9
50,038	57,584	229,680	0,282	3450,26	9,9	31,0
49,793	58,257	229,015	0,281	3185,26	9,7	31,2
49,825	59,283	225,710	0,280	2842,08	10,0	31,3
50,464	60,617	229,964	0,283	2485,75	9,9	31,5
50,334	61,007	230,196	0,281	2075,90	9,4	31,5
49,778	60,577	227,730	0,281	1872,02	10,0	31,5
49,945	60,876	225,210	0,280	1503,80	10,3	31,6

Tabela I.25 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,  
Fluido 2-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,723	49,907	226,738	0,563	5073,07	10,2	25,2
50,387	52,967	224,053	0,563	4677,78	9,7	25,4
50,090	55,048	222,011	0,564	4199,25	10,2	25,5
50,475	56,962	221,177	0,564	3819,92	9,5	25,6
50,037	57,788	224,707	0,565	3390,51	9,9	25,8
50,017	58,571	223,558	0,566	3127,92	10,2	25,9
50,486	59,803	222,182	0,565	2673,41	9,6	26,0
49,841	59,657	226,707	0,572	2304,96	9,8	26,2
49,818	60,179	226,466	0,566	1925,72	10,2	26,3
50,015	56,869	222,054	0,567	1554,85	10,2	26,9

Tabela I.26 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,  
Fluido 2-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,791	49,907	226,091	0,862	5081,31	9,5	29,3
49,959	52,279	226,274	0,862	4714,94	9,5	29,4
50,098	54,204	226,936	0,863	4364,26	9,7	29,4
50,052	55,710	226,193	0,864	4003,79	9,5	29,5
50,073	57,036	226,688	0,863	3590,94	9,5	29,6
50,136	58,425	227,063	0,864	3144,14	9,8	29,8
49,950	58,666	226,394	0,864	2784,99	9,3	30,0
49,910	58,714	226,343	0,865	2479,33	9,4	30,2
50,147	59,352	226,408	0,864	2157,79	9,7	30,4
50,008	57,404	226,770	0,865	1735,06	9,1	30,5
49,611	54,999	226,774	0,864	1495,43	9,7	30,6

Tabela I.27 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 2-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,100 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,100	50,410	220,872	1,139	5021,85	9,5	25,0
49,903	51,508	219,590	1,138	4806,26	9,6	25,1
50,289	54,114	223,812	1,145	4377,80	9,8	25,2
50,230	55,396	222,793	1,142	4068,41	9,4	25,3
49,838	56,307	221,803	1,143	3683,85	9,5	25,4
49,755	57,337	220,154	1,143	3312,60	9,7	25,4
50,137	58,157	219,042	1,144	2992,35	9,4	25,5
50,388	58,237	224,247	1,146	2711,04	9,5	25,7
50,015	57,888	219,088	1,146	2534,73	9,6	26,6
50,360	56,008	224,888	1,148	2172,01	9,6	26,9
49,968	54,444	220,089	1,149	1895,30	9,8	27,4
49,655	53,568	225,375	1,152	1407,60	9,7	27,7

Tabela I.28 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 2-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,125 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,264	50,316	223,811	1,450	5028,48	9,8	30,7
50,046	51,707	221,094	1,451	4743,39	9,2	30,8
50,025	53,456	219,783	1,452	4418,34	9,7	30,9
50,140	54,618	218,949	1,452	4196,31	9,2	31,0
50,376	56,004	222,894	1,428	3889,00	9,9	31,1
50,005	56,404	220,831	1,452	3615,73	9,5	31,2
50,051	57,321	219,744	1,455	3230,03	9,7	31,2
49,816	56,901	218,944	1,456	2958,74	9,2	31,2
49,973	57,037	224,785	1,428	2834,94	9,7	31,2
50,353	57,149	222,521	1,427	2584,80	10,1	31,2
49,826	54,199	220,288	1,427	2330,13	9,8	31,1
49,554	53,346	218,868	1,452	1964,37	10,0	31,1

Tabela I.29 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,896	50,099	221,262	0,288	5021,06	12,6	29,8
50,254	51,535	227,157	0,291	4830,64	12,4	29,9
49,951	52,814	227,143	0,292	4513,61	12,0	30,0
50,376	55,369	226,384	0,289	4085,45	11,9	30,1
50,207	56,661	223,008	0,289	3712,39	11,9	30,1
49,923	57,565	221,716	0,289	3401,98	11,6	30,2



50,079	58,762	227,159	0,293	3076,11	11,5	30,2
49,734	58,923	227,741	0,291	2854,94	11,5	30,2
49,833	59,681	226,407	0,291	2613,17	11,6	30,3
50,001	60,652	224,117	0,290	2086,38	11,4	30,3
49,904	60,867	222,396	0,290	1625,81	11,5	30,3
50,089	61,291	223,510	0,305	1375,75	11,5	30,2

Tabela I.30 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,535	49,715	234,821	0,552	5007,28	10,6	31,9
49,908	52,204	232,473	0,553	4650,71	10,3	31,9
50,555	55,210	231,288	0,553	4214,09	10,4	31,9
50,230	56,529	231,423	0,553	3813,99	10,2	32,3
50,597	58,551	230,048	0,552	3282,22	10,3	32,4
50,256	59,185	228,716	0,564	2947,60	10,5	32,5
50,106	59,485	235,137	0,566	2470,97	10,2	32,5
49,831	59,984	234,381	0,565	2014,82	10,5	32,5
49,826	60,155	231,970	0,565	1543,81	10,6	32,5

Tabela I.31 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,901	50,201	231,430	0,878	5000,00	10,9	32,6
49,726	52,672	228,857	0,854	4545,51	10,7	32,6
49,897	54,325	227,604	0,854	4244,11	10,7	32,6
50,030	55,731	226,187	0,854	3937,32	10,8	32,6
50,428	57,220	225,476	0,854	3590,01	10,5	32,6
50,259	57,681	232,199	0,855	3393,86	10,5	32,6
50,047	58,138	231,106	0,850	3026,80	10,6	32,7
50,004	58,329	229,263	0,855	2707,97	10,8	32,7
50,235	59,148	227,909	0,855	2250,90	10,8	32,7
50,260	58,315	226,676	0,855	1677,88	10,8	32,7

Tabela I.32 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,100 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,255	50,460	221,843	1,178	4990,19	14,3	34,2
50,407	52,608	221,016	1,178	4665,64	12,1	34,2
50,143	53,529	227,382	1,181	4408,98	10,7	34,3

50,301	55,184	226,119	1,149	4105,18	10,2	34,3
50,296	56,430	224,353	1,149	3766,66	9,5	34,3
50,154	57,091	222,252	1,148	3528,89	9,1	34,4
50,686	58,325	221,318	1,162	3037,33	9,1	34,5
50,166	57,775	227,761	1,164	2755,60	8,6	34,5
50,018	57,510	227,125	1,162	2468,93	8,6	34,5
50,435	54,130	225,293	1,162	2092,19	8,7	34,5

Tabela I.33 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de gás constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,125 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,022	50,321	223,953	1,479	4927,02	8,2	34,7
50,126	52,323	226,647	1,433	4597,29	8,0	34,7
50,058	53,902	223,733	1,459	4284,49	8,1	34,7
50,331	55,663	222,619	1,460	3877,55	7,8	34,7
49,998	56,872	221,564	1,460	3419,16	7,7	34,7
50,084	56,910	220,631	1,460	3051,28	7,9	34,7
49,786	56,394	219,861	1,461	2790,80	7,7	34,7
50,493	53,351	226,089	1,463	2399,38	7,9	34,7

Tabela I.34 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de líquido constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0.8.BEP} = 2560 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,846	60,119	313,627	0,000	2564,59	7,7	32,0
49,795	59,747	291,306	0,102	2557,22	7,6	32,0
49,698	59,496	290,227	0,226	2544,46	7,7	32,1
50,396	59,864	296,405	0,310	2543,28	7,9	32,1
50,506	59,655	292,932	0,415	2533,68	7,6	32,1
50,517	59,416	291,615	0,532	2517,66	7,7	32,1
50,253	58,568	293,408	0,691	2564,17	7,9	32,1
50,364	57,866	291,975	0,881	2538,16	7,7	32,1
50,333	57,429	289,971	0,985	2548,81	7,7	32,2
50,023	56,414	288,270	1,151	2600,45	7,9	32,2
50,407	55,060	286,549	1,317	2543,93	7,6	32,3
50,442	54,579	285,497	1,429	2533,01	7,7	32,4

Tabela I.35 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de líquido constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1.0.BEP} = 3200 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
----------------	----------------	--------------------	-----------------------------	-----------------------	---------------	-------------------

50,127	58,679	229,220	0,000	3206,95	10,4	27,8
50,165	58,605	225,866	0,145	3202,47	10,3	27,9
50,010	58,311	230,991	0,297	3207,76	10,3	28,0
49,977	58,351	226,820	0,447	3203,59	10,5	28,2
49,919	58,350	221,356	0,691	3222,02	10,6	28,3
49,922	58,243	224,404	0,849	3215,61	10,5	28,4
49,958	58,204	224,208	1,036	3209,20	10,6	28,5
50,094	58,096	220,617	1,215	3201,00	10,6	28,5
50,215	57,657	219,187	1,420	3188,89	10,6	29,1
49,998	57,022	217,894	1,588	3208,54	10,8	29,3
50,124	56,824	214,783	1,763	3197,46	10,7	29,4
50,008	56,372	213,273	1,972	3212,15	10,8	29,5
50,202	56,032	213,285	2,219	3187,09	10,9	29,7
50,112	55,396	211,442	2,440	3197,04	10,9	29,8
49,693	54,324	222,358	2,567	3244,58	10,8	30,0
50,180	53,201	250,211	2,606	3193,02	10,9	30,2
50,117	52,550	275,858	2,632	3207,09	10,9	30,3
50,319	52,107	298,806	2,653	3187,66	11,0	30,3
50,014	50,653	280,205	3,323	3221,47	10,9	30,4

Tabela I.36 – Teste bifásico com solução de água e isopropanol, vazão de líquido constante,

Fluido 3-ar,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 3840 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,927	55,960	313,618	0,00	3836,90	10,8	33,9
49,938	55,940	311,411	0,136	3832,24	10,9	34,0
49,988	56,142	283,506	0,344	3834,26	11,0	34,0
50,199	56,349	282,171	0,503	3836,13	11,0	34,0
50,389	56,393	280,591	0,695	3834,12	11,2	34,1
50,469	56,366	279,321	0,848	3828,70	11,2	34,1
50,227	55,946	281,601	1,056	3855,41	11,3	34,3
50,260	55,784	280,047	1,264	3843,23	11,3	34,3
50,387	55,786	277,339	1,532	3831,55	11,4	34,3
49,936	55,260	278,423	1,671	3823,38	15,1	31,3
50,164	55,364	258,561	1,959	3826,53	14,7	31,4
50,116	54,874	249,284	2,429	3823,87	14,5	31,4
49,889	54,372	292,127	2,360	3838,46	13,9	31,8
49,984	54,336	290,273	2,521	3828,98	13,8	31,8
49,989	54,008	300,142	2,648	3808,29	8,7	31,8
50,047	53,699	296,315	2,903	3805,07	7,8	31,7
50,079	52,883	303,145	3,122	3803,93	7,9	31,7
49,852	51,515	285,397	3,603	3825,65	8,0	31,7
0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,0	0,0

Tabela I.37 – Teste de desempenho monofásico com solução de água e glicerina,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 40,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ ,  $\rho = 1178 \text{ kg/m}^3$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
46,816	46,960	5432,84	39,9
50,466	52,123	5166,18	40,0
52,259	54,725	5023,30	40,0
56,678	60,991	4674,14	40,0
57,415	62,069	4602,34	40,0
59,255	64,591	4454,80	40,0
61,110	67,232	4290,74	40,0
62,561	69,090	4165,69	40,0
64,270	71,448	4009,57	40,0
66,157	74,073	3832,26	40,0
63,769	72,482	3612,27	40,0
62,786	72,501	3325,83	40,0
66,058	76,876	2970,27	40,0
67,430	78,645	2805,67	40,0
60,630	72,276	2669,18	40,0
62,117	74,164	2489,03	40,0
63,596	76,234	2275,16	40,0
64,772	77,671	2120,96	40,0
65,855	78,911	1967,44	40,0
66,528	79,811	1861,44	40,0
67,738	81,298	1681,99	40,0
68,846	82,660	1500,30	40,0
64,210	78,098	1407,56	40,0
64,678	78,711	1319,79	40,0
65,142	79,253	1230,14	40,0
65,818	80,094	1103,38	40,0
66,453	80,738	998,81	40,0
60,628	75,115	816,32	40,2
61,280	75,731	699,12	40,3
61,872	76,441	558,99	40,3
62,486	77,184	394,31	40,2
57,941	72,582	378,75	40,1
58,414	73,129	245,71	40,2
59,009	73,898	55,04	40,4

Tabela I.38 – Teste de desempenho monofásico com solução de água e glicerina,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 30,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 20 \text{ cP}$ ,  $\rho = 1184 \text{ kg/m}^3$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
50,846	50,952	5232,09	30,9
53,627	54,891	5043,77	30,9
56,414	58,800	4841,67	30,9
59,344	62,759	4640,62	30,9

62,408	66,997	4410,62	30,9
64,756	70,243	4216,46	30,9
67,231	73,599	4022,09	31,0
61,474	68,576	3852,94	31,0
50,626	59,023	3517,74	31,0
48,058	57,269	3334,22	30,9
50,190	59,929	3139,15	30,9
52,071	62,341	2952,40	30,9
54,465	65,493	2703,55	30,9
50,305	61,640	2600,03	31,0
45,591	57,198	2489,75	31,0
48,002	60,252	2213,68	30,9
50,277	63,179	1930,61	30,9
52,018	65,376	1693,57	31,0
53,055	66,696	1553,08	31,0
54,756	68,702	1310,77	31,0
56,251	70,396	1080,92	31,0
57,428	71,812	885,40	31,0
58,554	73,061	680,13	31,0
59,669	74,390	445,84	31,0
60,521	75,373	258,65	31,0
61,388	76,583	6,56	31,1

Tabela I.39 – Teste de desempenho monofásico com solução de água e glicerina,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 21,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 32 \text{ cP}$ ,  $\rho = 1189 \text{ kg/m}^3$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
53,730	53,717	4961,12	21,9
55,761	56,599	4829,33	21,9
59,605	61,734	4591,37	21,9
62,830	66,156	4374,81	21,9
65,065	69,028	4230,24	21,9
54,048	59,687	3865,62	21,9
48,896	55,239	3683,09	21,9
45,237	52,299	3554,44	21,9
48,105	55,985	3334,34	21,9
52,222	61,391	2999,57	21,9
54,173	63,911	2833,54	21,9
47,286	57,532	2658,83	21,9
49,154	60,070	2478,32	21,9
51,850	63,510	2230,22	21,9
53,269	65,254	2089,00	21,9
55,578	68,233	1849,42	21,9
57,506	70,536	1653,03	21,9
59,237	72,577	1463,08	21,9
60,323	73,893	1339,25	21,9
62,028	75,954	1126,73	21,9
63,342	77,485	963,42	21,9
59,049	73,294	891,94	21,8

60,435	75,012	701,23	21,8
61,795	76,354	510,63	21,8
62,816	77,651	331,81	21,8
63,364	78,264	238,33	21,8
64,432	79,659	44,00	21,8

Tabela I.40 – Teste de desempenho monofásico com solução de água e glicerina,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 50 \text{ cP}$ ,  $\rho = 1194 \text{ kg/m}^3$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]
59,566	59,918	4499,94	14,5
63,105	64,701	4300,62	14,5
66,477	69,149	4108,22	14,5
69,178	72,691	3950,85	14,5
65,780	70,137	3810,97	14,5
63,583	68,705	3652,80	14,5
58,148	64,077	3496,67	14,5
60,943	67,684	3319,49	14,5
55,424	62,799	3166,01	14,5
57,863	65,921	3003,91	14,5
50,473	59,219	2814,71	14,5
53,603	63,408	2587,85	14,5
57,418	68,163	2311,95	14,5
53,678	64,939	2135,40	14,5
56,208	68,058	1937,90	14,5
59,417	71,862	1669,45	14,6
62,401	75,425	1421,16	14,6
56,295	69,586	1301,88	14,5
57,734	71,407	1163,52	14,4
56,774	70,692	973,50	14,4
55,085	69,310	809,07	14,5
56,071	70,390	698,58	14,4
57,595	72,129	533,53	14,3
59,980	74,947	249,81	14,3
61,573	76,949	6,67	14,4

Tabela I.41 – Teste bifásico com solução de água e glicerina-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 40,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH <sub>2</sub> O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,000	50,386	207,623	0,148	5405,47	40,1	27,1
50,043	52,086	207,223	0,147	5108,48	40,0	27,1
50,105	53,419	215,030	0,150	4810,63	40,0	27,2
50,177	54,497	214,234	0,148	4535,73	40,0	27,2
49,849	55,981	210,977	0,148	4069,54	39,9	27,1
50,140	56,917	210,372	0,147	3793,31	39,9	27,1

49,778	57,075	209,908	0,147	3553,44	39,9	27,1
50,159	57,915	209,263	0,147	3154,15	39,9	27,1
50,706	55,337	209,032	0,147	2726,73	39,8	27,1
50,254	53,883	208,419	0,147	2124,74	39,8	27,1
50,107	53,720	207,853	0,147	1718,75	39,7	27,0

Tabela I.42 – Teste bifásico com solução de água e glicerina-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 40,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
49,920	50,395	211,772	0,295	5333,45	39,8	31,3
50,058	52,481	210,675	0,296	4956,78	40,0	31,4
49,937	53,518	209,609	0,296	4689,40	40,0	31,5
49,968	54,626	208,614	0,296	4392,35	40,0	31,7
50,185	55,933	207,784	0,296	4056,00	40,1	31,8
50,170	56,688	212,689	0,307	3663,12	40,2	31,9
50,095	56,463	215,090	0,300	3343,69	40,2	32,0
49,961	53,240	212,192	0,294	3050,65	40,2	32,1
50,245	52,215	210,454	0,298	2797,06	40,1	32,1

Tabela I.43 – Teste bifásico com solução de água e glicerina-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 40,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,018	50,072	210,932	0,609	5148,03	40,3	32,6
50,391	50,539	209,153	0,609	5125,99	40,3	32,6
50,287	52,619	207,962	0,610	4730,63	40,4	32,7
50,082	53,342	206,701	0,610	4520,44	40,4	32,8
50,021	54,230	205,822	0,608	4244,26	40,4	32,8
50,206	54,668	206,212	0,620	4031,86	40,4	32,8
50,726	52,688	212,547	0,612	3782,76	40,4	32,7
50,294	50,964	211,619	0,611	3428,78	40,4	32,7

Tabela I.44 – Teste bifásico com solução de água e glicerina-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 30,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 20 \text{ cP}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,121	50,121	211,220	0,145	5130,82	31,1	23,9
50,016	51,007	210,736	0,145	4937,73	31,2	23,9
49,852	52,672	210,277	0,146	4560,23	31,2	23,9
50,005	53,989	209,841	0,145	4262,80	31,2	23,9
50,147	55,055	209,281	0,145	4000,50	31,2	23,9

50,477	55,161	208,467	0,145	3683,17	31,3	23,9
50,102	53,910	207,759	0,145	3371,77	31,3	23,9
50,356	52,802	207,271	0,145	3009,57	31,4	23,9
50,209	51,422	214,332	0,151	2640,25	31,4	23,9

Tabela I.45 – Teste bifásico com solução de água e glicerina-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 30,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 20 \text{ cP}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,043	50,741	206,844	0,294	4812,15	31,1	23,8
50,134	51,706	206,529	0,294	4652,72	31,1	23,8
50,066	52,554	213,487	0,299	4440,62	31,1	23,8
50,044	53,508	213,931	0,296	4204,11	31,1	23,7
50,489	52,399	211,404	0,297	3877,74	31,1	23,7
50,456	51,552	210,595	0,297	3621,76	31,1	23,7
49,472	50,099	209,561	0,297	3253,60	31,1	23,7

Tabela I.46 – Teste bifásico com solução de água e glicerina-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 21,9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 32 \text{ cP}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,131	50,563	209,096	0,145	4421,33	22,1	24,1
50,184	51,095	208,577	0,145	4199,92	22,1	24,1
50,296	51,602	208,112	0,145	4028,21	22,2	24,1
50,523	51,550	207,584	0,144	3781,95	22,2	24,0
50,026	51,031	207,189	0,144	3431,88	22,2	24,0
50,262	51,720	215,049	0,147	3039,13	22,0	24,0
50,255	51,622	214,317	0,146	2734,37	22,1	24,0
50,197	50,921	213,513	0,147	2558,80	22,1	24,0
50,442	51,075	210,870	0,146	1394,88	22,0	23,9

Tabela I.47 – Teste bifásico com solução de água e glicerina-ar, vazão de gás constante,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $T_e = 14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 50 \text{ cP}$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$  e  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_{LFE}$ [kPa]	$\Delta P_{LFE}$ [inH2O]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_e$ [°C]	$T_{LFE}$ [°C]
50,254	50,650	209,897	0,146	3043,67	14,6	24,7
49,899	50,746	208,603	0,146	2836,67	14,6	24,6
50,459	51,382	208,374	0,146	2591,00	14,6	24,6
50,226	50,494	207,974	0,146	2307,22	14,7	24,6
50,281	50,021	215,594	0,148	1436,53	14,1	24,6



## I.2 Resultados medidos na montagem experimental B

Tabela I.48 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
56,758	55,428	63,066	56,092	59,620	26,6	26,6	29464,88	2,35
61,615	61,310	69,599	62,897	67,261	26,6	26,6	29145,75	2,37
67,808	68,468	77,597	71,285	76,583	26,6	26,7	28768,33	2,41
74,085	75,885	86,001	80,052	86,478	26,6	26,7	28355,87	2,48
80,588	83,488	94,485	89,017	96,573	26,6	26,7	27906,86	2,52
89,191	93,444	105,591	100,445	109,448	26,6	26,7	27372,36	2,57
97,475	102,880	116,191	111,554	121,909	26,6	26,7	26851,90	2,63
105,742	112,429	126,810	122,556	134,132	26,6	26,7	26312,37	2,68
115,942	124,086	139,731	135,886	149,143	26,6	26,7	25631,88	2,72
125,371	134,806	151,572	147,989	162,701	26,6	26,7	24997,85	2,75
131,819	142,142	159,710	156,332	171,875	26,6	26,7	24533,58	2,78
139,312	150,484	168,690	165,363	181,961	26,6	26,7	24025,96	2,79
145,389	157,416	176,358	173,276	190,883	26,6	26,7	23471,15	2,79
152,283	164,987	184,619	181,688	199,974	26,6	26,7	22964,79	2,79
156,696	169,944	189,986	187,153	206,028	26,6	26,7	22600,37	2,80
163,902	177,799	198,514	195,837	215,676	26,6	26,7	22036,47	2,79
169,493	184,194	205,360	202,829	223,293	26,6	26,7	21552,47	2,79
175,064	190,241	211,970	209,547	230,631	26,7	26,7	21075,36	2,79
179,176	194,814	216,941	214,569	236,094	26,7	26,7	20668,33	2,77
183,455	200,956	224,356	222,173	244,183	26,7	26,7	20276,38	2,85
188,706	206,721	230,588	228,426	250,920	26,7	26,7	19779,90	2,85
193,009	211,408	235,723	233,593	256,433	26,7	26,8	19338,66	2,85
199,050	218,140	243,013	240,817	264,379	26,7	26,8	18696,74	2,85
203,419	222,915	248,164	245,927	269,944	26,7	26,8	18248,39	2,85
208,926	228,824	254,706	252,207	277,013	26,7	26,8	17654,48	2,85
214,553	234,689	261,322	258,814	284,165	26,7	26,8	17005,59	2,83
218,023	238,474	265,575	262,853	288,679	26,7	26,8	16587,88	2,83
220,834	241,444	268,906	266,229	292,477	26,7	26,8	16208,16	2,84
198,302	219,133	247,235	244,556	271,417	26,7	26,8	15745,58	2,80
178,868	199,977	228,648	225,848	253,277	26,7	26,8	15268,01	2,77
160,213	181,517	210,843	208,116	235,892	26,7	26,8	14782,48	2,75
143,339	164,989	194,542	191,785	220,232	26,7	26,8	14293,40	2,72
146,220	168,154	198,091	195,266	224,178	26,7	26,8	13893,06	2,71
150,589	173,059	203,412	200,978	230,192	26,7	26,8	13248,11	2,68
154,198	176,987	207,726	205,811	235,492	26,7	26,8	12698,99	2,66
183,229	206,662	237,638	236,107	266,001	26,7	26,8	12318,79	2,67
186,072	210,186	241,620	240,608	271,145	26,7	26,8	11767,57	2,65
189,351	214,253	245,974	245,396	276,528	26,7	26,8	11140,56	2,63
191,687	217,193	249,132	248,808	280,563	26,7	26,8	10661,02	2,64
194,269	220,630	252,695	252,741	285,037	26,7	26,8	10100,70	2,61
196,687	223,902	256,092	256,529	289,286	26,7	26,8	9537,21	2,60
198,273	226,123	258,550	259,249	292,328	26,7	26,8	9079,22	2,58
198,222	226,149	258,499	259,273	292,270	26,7	26,8	9082,43	2,59
200,225	228,987	261,558	262,720	296,347	26,7	26,8	8478,93	2,57
202,078	231,557	264,314	265,891	299,809	26,7	26,8	7876,36	2,56

160,693	190,612	223,733	225,597	260,006	26,7	26,8	7369,11	2,53
162,032	192,536	225,741	228,255	262,790	26,7	26,9	6809,75	2,52
161,735	192,723	225,972	228,878	263,981	26,7	26,9	6309,50	2,51
162,196	193,504	227,042	230,110	265,511	26,7	26,9	5792,63	2,51
162,474	193,817	227,616	230,686	266,491	26,7	26,9	5273,36	2,49
162,232	193,975	227,923	231,129	267,465	26,7	26,9	4748,02	2,47
161,333	193,443	227,871	230,777	268,129	26,7	26,9	4017,66	2,46
160,365	193,075	227,690	230,470	268,247	26,7	26,9	3416,78	2,43
159,684	192,473	228,043	230,742	269,253	26,7	26,9	2879,40	2,46
159,299	192,462	228,519	230,915	270,362	26,8	27,0	2555,04	2,46
158,706	192,304	229,140	231,374	271,603	26,8	27,0	2050,20	2,46
158,572	192,392	229,655	231,714	272,384	26,8	27,1	1654,73	2,45
158,426	192,553	229,881	231,797	272,811	26,8	27,1	1446,94	2,45
158,286	192,677	230,827	232,410	273,778	26,8	27,2	979,88	2,45
157,878	192,775	231,425	232,817	274,625	26,8	27,4	534,13	2,44
157,701	192,594	231,876	233,106	274,742	26,9	27,7	352,07	2,45

Tabela I.49 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
73,348	75,177	88,390	76,123	80,290	25,6	25,7	39335,77	4,28
81,724	85,160	99,712	87,815	93,757	25,6	25,7	38942,88	4,34
98,309	104,575	121,388	110,676	119,001	25,6	25,7	38158,49	4,47
110,909	119,416	138,060	127,863	138,587	25,7	25,8	37559,47	4,59
127,418	138,767	159,594	150,357	163,897	25,7	25,8	36799,87	4,70
141,465	155,391	178,386	169,909	186,056	25,7	25,8	36054,97	4,79
159,802	176,787	202,060	194,587	213,553	25,7	25,8	35127,61	4,91
171,903	190,626	217,628	210,600	231,693	25,8	25,9	34532,70	4,97
184,155	205,106	233,238	226,751	249,556	25,8	25,9	33921,94	5,03
200,778	224,027	254,152	248,134	273,430	25,8	25,9	33055,08	5,10
213,636	238,656	270,206	264,630	292,276	25,8	25,9	32382,54	5,15
229,969	257,094	290,258	284,998	314,810	25,9	25,9	31501,27	5,17
208,654	237,333	271,554	266,714	298,050	25,9	26,0	30796,53	5,17
192,425	222,273	257,390	252,759	285,507	25,9	26,0	30236,04	5,15
178,785	209,547	245,411	241,166	274,812	25,9	26,0	29719,63	5,15
163,791	195,576	232,276	228,087	263,132	25,9	26,0	29109,53	5,13
152,426	184,934	222,170	218,197	254,053	25,9	26,0	28714,29	5,13
135,978	169,435	207,711	203,861	240,847	25,9	26,0	28099,49	5,09
120,836	155,457	195,725	192,369	230,646	26,0	26,0	27607,22	5,19
129,606	164,825	205,767	202,212	241,351	26,0	26,0	27081,45	5,17
138,984	174,652	216,619	213,237	253,123	26,0	26,1	26479,64	5,15
150,131	186,249	228,931	225,851	266,543	26,0	26,1	25728,30	5,14
161,011	197,903	241,689	238,333	280,213	26,0	26,1	24957,68	5,15
170,787	208,380	253,152	249,736	292,477	26,0	26,1	24268,94	5,15
182,131	220,273	266,188	262,440	306,715	26,0	26,1	23418,39	5,15
190,849	229,382	276,451	272,649	317,991	26,1	26,1	22716,31	5,15
199,540	238,622	286,849	282,749	329,118	26,1	26,2	21948,61	5,13
208,053	247,434	297,004	292,967	340,409	26,1	26,2	21214,04	5,12
216,792	256,643	307,332	303,046	351,747	26,1	26,2	20394,24	5,11
188,425	228,787	280,369	276,077	325,646	26,1	26,2	19729,77	5,03

168,442	209,405	261,569	257,352	307,679	26,1	26,2	19221,49	5,00
149,948	191,439	243,880	239,566	290,381	26,1	26,2	18718,34	4,97
156,583	198,692	251,881	247,920	299,576	26,1	26,2	18025,68	4,93
162,922	206,108	259,819	256,532	308,901	26,1	26,2	17302,91	4,89
168,138	212,233	266,477	263,801	316,946	26,2	26,3	16688,99	4,86
174,017	218,246	273,160	271,310	325,488	26,2	26,3	15996,96	4,83
179,745	225,150	280,684	279,778	335,152	26,2	26,3	15226,40	4,79
184,772	231,449	287,353	287,096	343,167	26,2	26,3	14564,69	4,77
190,487	238,652	294,816	295,268	352,266	26,2	26,3	13727,44	4,73
194,954	244,099	300,703	301,570	359,769	26,2	26,3	12993,45	4,72
199,478	250,408	307,307	309,266	368,015	26,2	26,3	12175,06	4,69
172,745	224,836	281,972	284,202	343,521	26,2	26,3	11624,35	4,67
131,434	184,577	242,178	245,102	305,151	26,2	26,3	11011,61	4,64
111,056	164,976	223,005	226,294	287,029	26,2	26,4	10469,42	4,61
114,255	169,163	227,531	231,632	292,790	26,2	26,4	9794,21	4,60
117,434	173,228	231,955	236,661	298,644	26,2	26,4	9004,99	4,58
120,259	177,161	236,020	241,544	303,902	26,2	26,4	8277,85	4,55
122,540	179,462	238,769	244,765	307,750	26,3	26,4	7662,66	4,53
124,280	181,386	240,859	246,752	310,440	26,3	26,4	7076,55	4,51
125,780	183,652	243,423	249,201	313,684	26,3	26,4	6476,32	4,49
126,451	184,983	245,283	251,059	316,602	26,3	26,5	5673,99	4,47
127,448	186,961	247,496	252,894	320,037	26,3	26,5	4744,08	4,44
127,075	187,139	249,037	254,063	322,813	26,3	26,6	3976,74	4,45
126,315	186,552	250,139	254,756	325,599	26,3	26,6	3323,81	4,47
125,514	186,574	251,186	255,628	327,268	26,3	26,7	2720,18	4,46
125,009	186,126	251,664	255,661	328,160	26,3	26,8	2166,81	4,44
124,579	186,535	253,196	256,724	329,816	26,4	27,0	1554,96	4,43
124,325	186,475	254,516	257,682	331,518	26,4	27,4	970,86	4,44
123,981	186,805	255,908	258,590	332,761	26,8	28,4	433,99	4,44

Tabela I.50 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
73,469	76,516	89,641	70,928	74,602	22,0	22,1	48383,58	6,75
83,266	89,159	108,624	90,768	100,363	22,1	22,2	48017,58	6,88
96,905	109,324	133,198	116,593	130,337	22,2	22,3	47488,07	7,02
117,207	133,974	161,689	146,338	163,684	22,2	22,3	46745,62	7,15
137,976	156,937	188,017	173,677	194,786	22,3	22,4	45913,19	7,25
160,391	182,436	216,530	203,591	228,098	22,3	22,4	45030,29	7,40
182,159	208,043	245,082	233,221	261,398	22,4	22,5	44155,78	7,56
195,921	224,876	263,546	252,406	283,702	22,4	22,5	43614,41	7,66
212,605	246,103	287,282	276,745	311,848	22,5	22,6	42853,47	7,81
189,997	224,563	268,881	259,420	298,486	22,5	22,6	41817,13	7,85
154,100	192,317	238,765	230,118	272,473	22,6	22,7	40889,31	7,89
133,130	175,392	223,573	215,383	260,464	22,6	22,7	40132,05	7,95
111,536	156,763	207,139	199,326	247,045	22,6	22,7	39213,72	7,97
99,246	143,806	195,362	188,215	237,537	22,7	22,8	38600,92	7,95
110,996	157,413	209,911	203,051	254,000	22,7	22,8	38037,71	7,97
126,624	176,446	230,437	223,890	276,755	22,7	22,8	37321,22	8,01
126,429	176,553	230,611	224,039	276,823	22,7	22,8	37318,85	8,01

139,348	189,059	244,652	238,309	292,345	22,8	22,9	36730,83	8,00
153,680	204,659	260,963	255,275	311,217	22,8	22,9	35944,54	7,99
171,819	226,009	283,782	278,323	336,346	22,9	23,0	35081,01	7,99
187,143	241,523	303,568	298,606	357,543	22,9	23,0	34299,42	8,09
200,231	255,478	318,796	314,037	374,244	22,9	23,0	33653,42	8,09
217,032	273,542	338,369	333,757	395,311	23,0	23,0	32788,36	8,09
192,132	249,776	315,959	311,392	373,995	23,0	23,1	31989,57	8,07
177,641	236,516	304,457	299,683	364,185	23,0	23,1	30980,68	8,04
191,986	251,840	321,125	316,137	382,164	23,0	23,1	30174,10	8,01
203,741	264,221	334,802	329,473	396,885	23,1	23,2	29474,70	8,03
216,045	277,025	348,978	343,415	412,344	23,1	23,2	28745,98	8,02
227,622	286,162	358,784	353,053	423,618	23,3	23,3	28033,20	7,93
196,365	255,562	329,822	323,956	395,975	23,3	23,4	27221,74	7,89
175,177	234,736	310,126	304,140	377,391	23,3	23,4	26632,69	7,89
152,493	212,453	289,385	283,226	357,838	23,3	23,4	25899,40	7,85
165,493	226,128	304,658	298,360	374,492	23,3	23,4	25012,04	7,82
176,460	237,862	317,528	311,275	388,551	23,4	23,5	24215,16	7,77
187,226	249,583	330,413	324,323	402,841	23,4	23,5	23402,11	7,74
197,400	260,635	342,569	336,866	416,340	23,4	23,5	22592,40	7,67
208,333	272,834	355,819	350,899	431,624	23,4	23,5	21627,55	7,62
215,552	281,189	365,092	361,196	442,646	23,5	23,6	20999,33	7,58
178,444	245,704	330,806	328,555	411,484	23,5	23,6	20053,10	7,51
142,959	211,784	297,514	296,213	380,693	23,5	23,6	19357,76	7,47
109,701	180,172	266,602	266,147	352,129	23,6	23,7	18563,91	7,41
118,505	190,928	277,943	278,393	365,690	23,6	23,7	17690,43	7,35
126,220	200,868	288,234	289,881	378,244	23,6	23,7	16821,05	7,31
134,251	211,065	298,902	301,327	391,123	23,6	23,7	15879,86	7,28
141,070	220,023	308,328	311,547	402,351	23,6	23,8	15023,41	7,24
148,034	229,068	318,205	322,373	414,215	23,7	23,8	14104,09	7,21
152,769	235,342	324,912	329,951	422,565	23,7	23,8	13382,57	7,19
158,659	243,161	333,544	339,622	433,108	23,7	23,9	12481,74	7,16
164,468	250,504	341,723	348,991	443,583	23,8	23,9	11404,83	7,14
167,300	254,038	345,504	353,707	448,833	23,8	24,0	10785,51	7,11
171,286	259,356	351,079	360,381	456,207	23,8	24,0	9976,21	7,09
174,772	263,090	355,343	365,130	462,061	23,8	24,1	9108,15	7,07
177,694	266,478	359,351	368,729	467,221	23,9	24,1	8299,72	7,02
174,304	264,235	357,517	366,805	466,868	23,9	24,2	7459,78	6,98
110,459	201,634	295,744	304,603	405,840	24,0	24,2	6705,34	6,95
112,405	204,636	298,900	307,716	410,510	24,0	24,3	5907,90	6,92
113,082	206,034	301,734	310,586	414,775	24,0	24,4	5068,31	6,93
113,593	206,731	305,251	313,504	420,121	24,0	24,5	4305,96	6,97
113,225	207,422	307,215	314,459	424,148	24,1	24,6	3635,82	6,99
112,211	207,776	308,799	315,566	426,864	24,1	24,8	2924,07	6,99
111,346	208,115	311,452	317,707	430,499	24,2	25,2	2013,45	6,97
111,014	208,952	313,024	318,439	432,976	24,3	25,6	1427,78	6,96
110,800	208,854	314,804	319,773	434,550	24,4	26,3	960,77	6,96
110,515	209,107	316,098	320,826	435,728	24,9	27,4	537,82	6,97
110,453	209,171	316,544	320,888	436,005	26,2	29,1	345,87	6,97

Tabela I.51 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
135,472	154,080	196,995	179,350	212,236	23,5	23,6	52720,99	9,90
163,362	190,461	237,741	221,682	259,051	23,6	23,7	51768,26	10,09
200,254	230,888	283,244	268,769	313,299	23,6	23,7	50501,20	10,30
227,789	262,198	317,400	304,342	353,082	23,6	23,7	49532,28	10,43
132,905	170,714	229,453	217,271	271,333	23,7	23,8	48537,02	10,48
162,199	208,103	269,393	258,362	316,676	23,7	23,8	47450,48	10,63
193,930	246,168	310,922	300,707	363,265	23,8	23,8	46266,23	10,76
162,782	219,467	287,352	277,875	344,102	23,8	23,9	45163,34	10,79
146,404	204,639	274,205	265,192	333,530	23,8	23,9	44545,23	10,82
141,532	202,265	275,211	267,157	339,871	23,8	23,9	43145,67	10,83
168,004	231,600	306,710	299,384	375,071	23,9	23,9	42018,44	10,80
168,529	231,895	306,745	299,428	375,084	23,9	24,0	42015,99	10,79
190,359	256,690	333,843	327,122	405,091	23,9	24,0	41058,57	10,75
177,857	244,050	327,378	321,659	402,543	23,9	24,0	39752,89	10,85
193,497	262,542	347,383	341,971	424,464	24,0	24,1	38997,15	10,87
203,605	273,088	358,964	353,559	437,103	24,0	24,1	38494,08	10,86
216,342	286,692	373,940	368,430	453,342	24,0	24,1	37955,85	10,86
229,155	300,429	389,054	383,605	469,686	24,0	24,1	37391,27	10,87
240,421	313,352	403,018	397,609	484,508	24,1	24,2	36827,38	10,87
228,004	302,593	393,523	387,908	476,223	24,1	24,2	36205,19	10,86
200,497	276,898	369,375	363,437	453,657	24,1	24,2	35440,97	10,85
155,971	235,125	330,435	324,003	417,651	24,1	24,2	34154,84	10,85
131,649	211,958	309,006	302,397	397,791	24,1	24,3	33413,70	10,82
134,943	217,344	317,771	310,446	408,887	24,2	24,3	32015,15	10,79
106,844	190,654	293,022	285,700	385,849	24,2	24,3	31241,24	10,77
126,515	211,809	316,833	309,201	411,736	24,2	24,3	30062,08	10,73
138,461	224,333	330,621	322,804	426,707	24,2	24,3	29403,44	10,69
157,725	244,933	353,053	345,274	451,185	24,2	24,3	28273,78	10,61
176,132	265,068	375,048	367,541	475,444	24,2	24,3	27104,46	10,54
192,672	283,280	394,751	387,769	497,363	24,3	24,4	26017,98	10,44
207,767	300,194	412,916	407,208	518,294	24,3	24,4	24981,09	10,34
220,168	314,402	428,385	424,305	536,943	24,3	24,4	24034,16	10,28
232,356	329,136	444,438	442,117	556,749	24,3	24,4	23068,04	10,21
246,930	346,815	463,536	463,021	580,325	24,3	24,5	21805,06	10,13
264,044	367,860	485,595	487,031	607,094	24,4	24,5	20290,50	10,02
275,043	381,634	500,164	502,932	624,847	24,4	24,5	19200,91	9,96
284,919	394,473	513,688	517,879	641,533	24,4	24,6	18097,93	9,91
291,376	403,450	523,219	528,284	653,061	24,4	24,6	17318,43	9,88
237,601	352,325	472,975	479,235	605,159	24,4	24,6	16382,09	9,81
178,149	294,904	416,559	424,003	551,351	24,5	24,6	15451,44	9,77
112,901	232,462	355,227	364,135	492,964	24,5	24,7	14281,93	9,72
72,155	193,832	317,233	328,017	458,649	24,5	24,7	13108,25	9,67
76,970	200,106	324,043	335,830	467,232	24,5	24,7	12376,94	9,63
75,008	198,992	323,617	336,861	470,174	24,5	24,8	10985,33	9,55
98,631	224,947	349,670	363,129	498,476	24,5	24,8	9880,78	9,49
102,923	231,333	356,463	370,019	506,969	24,6	24,9	8853,91	9,43
106,320	236,435	362,734	375,124	513,844	24,6	24,9	7940,56	9,39
110,759	241,805	369,060	381,480	523,242	24,7	25,1	6637,49	9,38

112,659	245,135	376,192	387,331	533,880	24,7	25,2	5417,98	9,45
113,264	246,820	380,352	391,290	539,962	24,7	25,3	4678,89	9,47
113,078	249,312	385,554	395,252	547,553	24,7	25,6	3492,75	9,46
95,976	234,194	373,864	382,834	537,009	24,8	26,0	2458,25	9,42
95,549	234,692	375,509	383,818	539,248	24,8	26,5	1844,73	9,40
95,347	235,257	377,603	385,380	541,413	24,9	27,4	1182,13	9,39
94,716	235,841	379,206	385,377	542,899	28,6	32,3	263,60	9,39

Tabela I.52 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
21,518	21,334	27,945	19,345	20,710	21,3	21,3	28848,26	2,43
22,560	22,471	29,355	20,732	22,417	21,3	21,4	28791,23	2,44
21,984	22,021	29,052	20,547	22,332	21,3	21,4	28736,34	2,46
22,911	23,138	30,283	21,671	23,615	21,3	21,4	28679,89	2,46
27,124	28,144	35,945	27,655	30,360	21,4	21,4	28395,83	2,47
30,753	32,186	40,500	32,417	35,891	21,4	21,4	28174,84	2,50
32,948	34,829	43,488	35,380	39,241	21,4	21,4	28039,31	2,51
39,421	42,405	51,955	44,263	49,437	21,4	21,5	27621,06	2,55
42,474	46,027	55,941	48,438	54,028	21,4	21,5	27432,56	2,57
45,989	50,411	60,810	53,542	59,821	21,4	21,5	27174,94	2,58
50,873	56,194	67,256	60,244	67,301	21,4	21,5	26847,69	2,62
57,165	63,517	75,549	68,870	77,244	21,4	21,5	26390,37	2,65
65,624	73,153	86,167	79,736	89,510	21,4	21,5	25843,55	2,68
76,812	86,089	100,350	94,325	105,873	21,4	21,5	25085,53	2,69
82,405	90,917	104,778	98,661	109,635	21,5	21,5	25360,79	2,69
92,715	102,747	117,608	111,816	124,312	21,5	21,6	24668,96	2,69
102,880	114,157	129,944	124,402	138,286	21,5	21,6	23948,66	2,67
109,117	121,315	137,860	132,473	147,277	21,5	21,6	23480,60	2,70
116,026	129,100	146,329	141,117	156,787	21,6	21,6	22946,62	2,69
121,842	135,132	154,047	148,914	165,582	21,6	21,6	22494,96	2,74
128,201	142,057	161,607	156,581	173,970	21,6	21,6	22013,33	2,76
134,647	149,278	169,320	164,476	182,648	21,6	21,6	21469,84	2,76
138,997	154,249	174,729	170,037	188,688	21,6	21,7	21099,54	2,78
144,162	159,824	180,666	176,079	195,239	21,6	21,7	20656,36	2,78
152,342	168,903	190,531	186,031	206,077	21,7	21,7	19872,35	2,77
153,927	170,701	192,543	188,029	208,244	21,7	21,7	19727,91	2,77
157,627	174,708	196,895	192,559	213,120	21,7	21,7	19388,23	2,79
162,595	180,194	202,773	198,342	219,228	21,7	21,8	18893,00	2,77
166,054	183,962	206,884	202,311	223,652	21,7	21,8	18537,92	2,77
169,534	187,732	211,031	206,365	228,125	21,7	21,8	18150,76	2,78
174,299	192,993	216,883	212,089	234,360	21,7	21,8	17623,22	2,75
178,708	197,702	222,185	217,263	240,115	21,8	21,8	17131,41	2,75
182,940	202,142	227,134	222,262	245,696	21,8	21,8	16640,28	2,75
187,487	207,044	232,716	227,637	251,620	21,8	21,8	16083,78	2,73
191,905	211,428	237,822	232,783	257,288	21,8	21,9	15534,87	2,72
195,553	215,147	241,867	236,803	261,905	21,8	21,9	15044,59	2,70
199,007	218,885	246,068	240,901	266,432	21,8	21,9	14555,87	2,68
203,834	224,389	252,254	247,378	273,488	21,8	21,9	13822,34	2,66
206,915	227,807	255,926	251,265	277,730	21,9	21,9	13261,48	2,63

210,766	232,405	261,000	256,955	284,006	21,9	21,9	12611,78	2,60
214,380	236,568	265,736	262,219	289,932	21,9	22,0	11999,26	2,57
218,705	241,997	271,464	268,556	297,202	21,9	22,0	11184,04	2,56
221,579	245,786	275,319	272,731	301,948	21,9	22,0	10603,81	2,54
224,698	249,828	279,675	277,664	307,506	21,9	22,0	9873,60	2,52
227,067	253,141	283,296	281,763	312,293	21,9	22,0	9202,56	2,51
228,531	255,349	285,581	284,502	315,449	22,0	22,1	8634,50	2,50
175,565	203,419	233,976	233,312	264,614	22,0	22,1	7967,05	2,45
165,870	194,522	225,260	225,174	256,757	22,0	22,1	7435,18	2,46
167,135	196,168	227,184	227,269	259,298	22,0	22,1	6897,70	2,45
166,996	196,542	227,656	228,264	260,631	22,1	22,2	6339,75	2,44
167,483	197,228	228,606	229,446	262,215	22,1	22,2	5766,52	2,44
167,380	197,183	228,731	229,761	263,118	22,1	22,2	5136,80	2,40
166,765	197,081	228,994	229,794	263,907	22,1	22,2	4436,51	2,39
165,639	196,615	228,810	229,377	264,360	22,1	22,3	3687,53	2,38
165,057	196,327	228,695	229,296	264,477	22,2	22,3	3327,37	2,38
164,407	195,799	228,706	229,077	265,214	22,2	22,4	2848,60	2,38
163,974	195,686	229,453	229,613	266,477	22,2	22,4	2409,35	2,38
163,639	195,619	229,861	229,836	267,519	22,2	22,5	2050,74	2,39
163,334	195,792	230,455	230,265	268,516	22,3	22,6	1711,75	2,39
163,127	195,736	231,150	230,719	269,211	22,3	22,7	1345,39	2,38
162,551	195,927	232,227	231,317	270,496	22,4	23,0	576,89	2,38
165,385	198,760	235,095	234,110	273,177	22,4	23,2	620,84	2,38
170,286	203,888	240,012	239,174	278,306	22,4	23,2	625,20	2,38
176,593	209,591	245,380	244,578	283,748	22,4	23,1	902,54	2,38
176,269	209,526	246,271	245,280	284,300	22,5	23,1	407,43	2,38

Tabela I.53 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
37,560	28,931	42,316	29,745	36,039	20,4	20,5	37944,94	4,17
41,419	32,458	46,718	34,255	41,513	20,4	20,5	37773,19	4,17
42,369	34,500	49,026	36,585	44,019	20,5	20,5	37758,50	4,19
48,440	42,488	58,122	46,114	54,604	20,5	20,5	37455,70	4,23
56,986	52,537	69,362	57,940	68,206	20,5	20,6	37033,37	4,27
69,172	66,485	84,941	74,223	86,350	20,5	20,6	36477,48	4,32
78,061	77,208	96,808	86,821	100,771	20,6	20,7	36025,69	4,36
91,269	93,671	115,142	105,590	121,743	20,5	20,6	35392,64	4,43
105,152	110,343	133,337	124,443	142,703	20,6	20,6	34692,16	4,50
116,774	124,060	148,480	140,134	160,309	20,6	20,6	34089,64	4,56
128,943	138,563	164,637	156,479	178,652	20,6	20,6	33438,68	4,62
142,432	154,644	182,202	174,576	198,912	20,6	20,7	32703,78	4,67
153,312	166,900	195,504	188,117	214,034	20,6	20,7	32116,45	4,70
164,627	180,620	210,024	203,282	230,544	20,6	20,7	31500,87	4,75
172,368	189,101	219,613	212,681	241,069	20,6	20,7	31127,82	4,77
179,905	198,641	228,922	223,084	251,717	20,6	20,7	30736,84	4,77
189,432	209,186	241,634	234,926	265,676	20,7	20,7	30167,63	4,75
200,499	221,922	255,368	248,891	280,895	20,7	20,7	29553,10	4,77
181,782	205,315	239,218	233,417	266,251	20,7	20,7	28966,02	4,78
161,585	187,021	221,922	216,360	250,472	20,7	20,8	28280,71	4,78



149,734	176,391	213,650	208,096	242,448	20,7	20,8	27909,09	4,89
140,097	167,596	205,416	199,849	234,763	20,7	20,8	27578,48	4,93
148,853	177,823	216,348	210,997	246,656	20,7	20,8	27021,72	4,92
154,884	184,489	223,529	218,206	254,481	20,7	20,8	26643,38	4,91
161,461	191,985	231,544	226,295	262,983	20,7	20,8	26218,27	4,91
170,410	201,733	242,406	236,937	274,628	20,7	20,8	25644,82	4,92
179,068	211,534	252,980	247,523	286,034	20,8	20,8	25006,82	4,91
181,926	215,443	257,644	252,098	291,488	20,8	20,8	24382,71	4,91
188,626	222,673	265,704	260,009	300,229	20,8	20,8	23898,82	4,92
197,520	232,509	276,621	270,783	311,970	20,8	20,8	23194,65	4,90
206,455	242,255	287,614	281,540	323,845	20,8	20,9	22440,14	4,89
213,782	250,257	296,713	290,449	333,781	20,8	20,9	21806,02	4,90
221,541	258,480	305,877	299,479	344,051	20,8	20,9	21115,20	4,90
229,126	266,691	315,108	308,720	354,143	20,8	20,9	20413,25	4,87
236,585	274,833	324,135	317,741	364,082	20,8	20,9	19665,89	4,84
244,191	283,451	333,323	327,139	374,466	20,8	20,9	18861,64	4,79
252,729	293,050	343,864	337,883	386,258	20,8	20,9	17934,87	4,74
261,399	302,615	354,125	349,165	398,474	20,9	20,9	16964,52	4,70
223,359	265,850	318,269	314,314	364,524	20,9	20,9	16164,49	4,63
201,148	244,339	297,048	293,600	344,658	20,9	20,9	15703,65	4,60
172,975	217,215	270,683	267,798	319,739	20,9	21,0	14957,68	4,56
131,928	177,658	231,101	228,997	282,023	20,9	21,0	14290,08	4,51
136,477	183,235	237,084	235,474	289,238	20,9	21,0	13639,91	4,50
141,054	189,013	243,249	242,216	296,861	20,9	21,0	12945,29	4,48
147,234	197,708	252,342	252,175	307,977	20,9	21,0	11895,24	4,46
150,774	202,980	257,982	258,524	315,184	20,9	21,0	11137,39	4,43
154,696	208,256	263,864	265,064	322,202	20,9	21,0	10350,22	4,42
157,779	212,247	268,071	269,922	327,597	20,9	21,0	9712,16	4,40
160,846	216,251	272,433	275,046	333,156	20,9	21,0	8976,29	4,39
163,726	220,048	276,428	279,996	338,679	20,9	21,1	8195,20	4,36
166,577	223,115	279,887	283,867	343,701	20,9	21,1	7166,59	4,31
166,660	224,199	281,320	285,384	346,193	21,0	21,1	6371,03	4,29
167,156	225,528	282,691	286,365	348,272	21,0	21,2	5737,24	4,27
166,936	226,188	283,624	286,946	350,020	21,0	21,2	5024,49	4,26
166,286	225,881	284,489	287,641	351,597	21,0	21,3	4283,43	4,24
165,245	225,312	285,427	288,198	353,974	21,0	21,3	3511,61	4,27
164,294	224,646	286,241	288,590	356,205	21,1	21,4	2872,60	4,29
163,699	225,136	287,675	289,549	358,501	21,1	21,5	2293,52	4,28
163,308	225,645	289,199	290,726	360,478	21,1	21,7	1747,52	4,28
163,027	226,387	290,782	291,730	362,455	21,2	22,2	1006,74	4,27
162,882	226,251	291,176	291,830	362,810	21,3	22,7	679,83	4,25
162,568	225,874	291,579	291,954	363,260	22,0	23,9	351,99	4,25

Tabela I.54 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
55,169	59,450	71,286	51,580	54,412	23,6	23,6	47638,08	6,93
57,558	60,973	73,605	54,014	58,244	23,6	23,7	47552,72	6,95
58,857	64,716	78,544	59,121	65,083	23,6	23,7	47486,44	6,98
65,316	72,381	90,025	71,231	80,683	23,7	23,8	47263,65	7,02



70,804	80,716	101,307	83,038	94,861	23,7	23,8	47027,35	7,05
75,943	86,625	109,072	91,114	104,371	23,8	23,8	46833,32	7,09
87,426	101,855	126,722	109,638	125,512	23,8	23,9	46381,60	7,14
95,750	111,045	137,483	120,890	138,220	23,8	23,9	46090,48	7,17
111,410	129,175	158,665	143,105	164,541	23,8	23,9	45480,04	7,31
127,094	146,902	179,766	165,169	189,478	23,9	24,0	44831,15	7,42
138,801	160,006	194,330	180,426	206,393	23,9	24,0	44384,16	7,48
157,729	182,335	219,093	206,091	234,775	24,0	24,1	43618,22	7,57
176,357	203,787	242,824	230,703	262,479	24,0	24,1	42827,24	7,62
192,458	222,421	263,260	251,852	287,089	24,1	24,2	42078,55	7,68
207,597	239,478	282,021	271,293	308,747	24,1	24,2	41436,42	7,75
222,106	256,973	300,831	290,475	330,187	24,2	24,3	40807,76	7,81
199,439	237,337	283,112	273,387	315,467	24,2	24,3	40050,90	7,85
183,369	223,701	270,761	261,237	304,981	24,2	24,3	39516,12	7,86
165,714	207,702	255,951	247,052	292,696	24,3	24,3	38819,09	7,86
233,004	277,276	334,292	326,589	380,250	24,4	24,5	35775,26	7,94
190,478	229,440	283,372	274,397	323,242	24,5	24,6	37742,94	7,85
202,045	242,724	297,264	288,767	339,141	24,5	24,6	37191,64	7,91
191,332	232,670	288,045	279,694	330,910	24,5	24,6	36809,01	7,91
180,968	223,245	279,307	271,126	323,328	24,6	24,6	36440,47	7,93
168,681	211,810	268,580	260,716	313,993	24,6	24,7	36013,24	7,93
148,382	193,341	251,366	243,985	298,658	24,6	24,7	35274,48	7,95
135,019	180,759	239,714	232,596	288,327	24,6	24,7	34802,52	7,94
149,151	196,473	256,668	250,029	306,573	24,7	24,8	34068,00	7,96
156,673	204,802	265,533	258,991	316,258	24,7	24,8	33719,34	7,97
167,467	216,647	278,344	271,995	330,123	24,7	24,8	33144,11	7,98
183,744	234,488	297,625	291,308	350,940	24,7	24,8	32331,61	7,97
171,220	222,713	286,437	280,151	340,551	24,8	24,8	31899,62	7,99
186,270	239,447	304,486	298,113	359,992	24,8	24,9	31040,84	7,97
198,340	252,508	318,704	312,138	375,330	24,8	24,9	30395,54	7,97
216,981	272,715	340,579	333,593	398,908	24,8	24,9	29337,67	7,97
232,592	289,299	358,796	351,490	418,721	24,9	25,0	28369,46	7,95
244,737	301,839	373,015	365,444	434,187	24,9	25,0	27561,97	7,94
259,621	317,326	390,442	382,669	453,169	24,9	25,0	26553,00	7,91
271,321	329,626	404,373	396,352	468,590	24,9	25,0	25715,42	7,94
192,912	251,595	326,773	318,604	391,574	25,0	25,1	25465,83	7,96
180,181	239,121	314,724	306,616	380,059	25,0	25,1	25167,94	7,90
162,501	221,855	298,163	290,023	364,267	25,1	25,2	24666,02	7,81
173,105	233,139	310,746	302,722	378,046	25,1	25,2	23914,52	7,76
183,567	244,625	323,270	315,415	392,030	25,1	25,2	23088,11	7,72
141,832	199,885	273,971	266,030	337,916	25,1	25,2	26102,05	7,83
131,276	188,884	261,820	253,984	324,607	25,1	25,2	26769,31	7,86
121,551	178,705	250,114	242,624	311,947	25,2	25,3	27415,26	7,87
109,802	166,524	236,570	229,105	297,255	25,2	25,3	28108,40	7,88
90,946	146,416	214,437	207,437	273,403	25,2	25,3	29224,08	7,89
76,248	130,695	197,319	190,695	254,719	25,2	25,3	30099,74	7,92
96,110	149,367	214,724	208,344	271,260	25,2	25,3	30830,33	7,96
114,545	166,560	230,789	224,589	285,983	25,2	25,3	31524,15	7,95
153,771	212,481	288,010	279,844	353,270	25,3	25,4	25293,53	7,83
187,408	248,722	327,927	320,155	397,313	25,3	25,4	22740,03	7,69
200,224	263,048	343,432	336,568	415,194	25,3	25,4	21656,21	7,62
175,669	239,499	320,411	314,298	393,417	25,3	25,5	21168,35	7,58

185,770	251,060	333,280	328,553	409,196	25,4	25,5	20243,40	7,54
195,121	262,109	345,303	341,949	424,311	25,4	25,5	19318,37	7,49
204,451	273,432	357,459	355,132	439,199	25,4	25,5	18372,86	7,43
164,901	235,469	319,967	318,422	403,739	25,4	25,5	17647,76	7,36
174,353	247,233	332,426	331,986	419,017	25,4	25,5	16589,47	7,31
182,249	257,758	343,371	344,112	432,347	25,4	25,6	15573,88	7,27
190,456	268,779	355,084	356,929	446,398	25,4	25,6	14472,52	7,23
198,012	278,620	366,203	369,031	459,809	25,5	25,6	13324,53	7,18
203,335	285,411	373,775	377,823	469,413	25,5	25,6	12433,01	7,17
209,931	293,909	383,003	388,522	481,382	25,5	25,7	11204,94	7,14
185,081	270,198	359,806	366,166	460,003	25,5	25,7	10358,00	7,10
162,545	248,533	338,290	345,433	440,494	25,5	25,7	9445,85	7,05
166,143	252,425	342,637	350,144	446,437	25,5	25,7	8477,00	7,00
168,075	255,149	346,162	353,530	450,975	25,5	25,8	7790,85	6,97
166,308	254,941	345,956	353,212	452,117	25,5	25,8	6849,02	6,94
167,271	257,258	349,563	356,432	457,259	25,6	25,9	5720,89	6,92
158,829	249,596	343,989	350,214	453,937	25,6	26,0	4724,89	6,94
157,835	249,254	345,721	351,526	458,564	25,6	26,1	3852,52	6,99
156,553	249,428	348,070	352,603	462,210	25,6	26,2	3014,16	7,08
155,419	249,662	350,855	354,412	465,742	25,6	26,6	1987,68	7,03
155,124	250,522	353,304	356,033	469,090	25,7	27,2	1129,30	7,02
154,735	250,204	355,385	357,979	470,643	26,4	28,3	440,41	6,94

Tabela I.55 – Teste de desempenho monofásico com água,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
85,466	107,778	146,412	126,444	158,749	33,2	33,3	52501,81	10,25
99,670	127,679	171,775	152,783	187,802	33,2	33,4	52139,29	10,27
114,794	148,402	195,683	177,372	215,111	33,3	33,4	51496,11	10,39
136,461	174,672	225,316	208,266	249,707	33,3	33,5	50742,82	10,48
155,895	196,859	249,435	233,518	277,602	33,4	33,5	50078,71	10,55
147,983	190,670	245,825	230,685	277,723	33,4	33,5	49426,35	10,61
150,423	197,930	255,326	240,998	292,262	33,4	33,5	48524,59	10,67
142,796	193,275	253,139	239,415	294,055	33,4	33,6	47739,56	10,84
131,270	184,993	246,656	233,820	290,921	33,5	33,6	47006,92	10,83
123,021	178,761	242,698	230,387	290,297	33,5	33,6	46249,45	10,82
111,847	169,683	235,626	223,625	286,744	33,5	33,6	45485,31	10,80
95,992	156,815	224,686	213,719	279,495	33,5	33,7	44551,36	10,81
93,475	156,297	225,588	214,666	282,299	33,6	33,7	44045,45	10,76
102,766	166,567	236,569	225,996	294,490	33,6	33,7	43673,67	10,71
114,452	178,976	250,100	239,786	309,928	33,6	33,7	43182,05	10,74
108,246	172,765	249,533	239,588	311,561	33,6	33,8	42352,75	10,97
121,440	186,736	264,750	255,102	328,606	33,7	33,8	41800,47	10,96
140,253	207,328	286,721	277,790	353,093	33,7	33,8	40991,12	11,08
136,754	205,539	286,837	278,301	355,967	33,7	33,8	40013,91	11,10
161,082	231,845	315,374	307,238	387,090	33,7	33,8	38922,77	11,28
145,712	219,710	306,780	298,844	382,180	33,7	33,9	37084,79	11,14
145,167	221,056	310,640	302,240	388,403	33,7	33,9	35878,80	11,12
173,184	252,438	346,938	337,715	429,891	33,8	33,9	33280,84	10,98
161,331	240,095	333,134	324,410	414,991	33,8	33,9	33866,58	10,94

154,980	233,066	325,733	316,885	406,957	33,8	33,9	34204,75	11,01
190,802	270,620	367,140	357,839	451,842	33,8	33,9	32363,34	10,96
218,193	299,024	398,947	389,183	486,408	33,8	34,0	30932,01	10,89
207,836	289,734	391,898	382,138	481,532	33,8	34,0	29816,21	10,85
211,265	294,536	399,373	389,232	491,636	33,8	34,0	28450,98	10,72
193,293	277,772	384,207	374,370	478,444	33,9	34,0	27426,37	10,65
177,247	263,069	371,120	361,499	467,101	33,9	34,0	26473,50	10,56
172,005	259,719	368,607	360,244	467,162	33,9	34,0	25478,93	10,56
151,790	241,107	351,822	344,559	453,087	33,9	34,0	24506,73	10,43
139,667	231,222	343,510	338,243	448,580	33,9	34,1	23446,91	10,30
156,305	250,818	364,451	361,370	474,489	33,9	34,1	22115,03	10,23
170,307	267,788	382,606	381,056	496,665	33,9	34,1	20919,32	10,15
166,767	267,086	382,355	382,390	499,636	33,9	34,1	19866,47	10,07
160,197	262,982	379,325	380,136	499,364	33,9	34,1	18842,44	10,17
172,792	279,687	396,767	399,119	520,459	33,9	34,1	17479,48	10,22
162,809	271,126	388,329	391,266	513,165	33,9	34,1	17069,29	10,08
152,535	262,563	380,678	384,317	507,115	34,0	34,2	16392,24	10,01
138,338	250,353	369,443	374,088	497,940	34,0	34,2	15531,16	9,89
126,881	240,327	359,771	365,329	489,712	34,0	34,2	14993,24	9,81
111,093	225,981	346,558	353,115	478,841	34,0	34,2	14100,39	9,72
100,897	217,334	339,015	347,131	474,303	34,0	34,2	12985,66	9,71
108,266	227,165	349,044	358,788	487,337	34,0	34,2	11797,76	9,72
113,025	231,875	354,126	365,163	494,631	34,0	34,2	10911,52	9,67
117,319	237,101	359,808	371,019	502,233	34,0	34,3	10024,46	9,61
121,510	242,616	365,950	377,297	510,143	34,0	34,3	9026,49	9,60
124,313	246,162	370,346	381,089	515,437	34,0	34,3	8356,32	9,65
126,490	249,309	373,657	384,900	520,046	34,0	34,4	7660,87	9,70
123,850	247,927	373,178	383,492	521,134	34,0	34,4	6849,42	9,73
120,727	246,035	372,620	382,845	522,415	34,0	34,5	6013,95	9,79
116,286	242,125	372,381	381,652	525,512	34,0	34,6	5072,36	9,92
114,770	242,751	375,299	383,574	530,420	33,9	34,7	4129,71	9,78
113,721	243,323	378,786	385,906	535,844	33,9	34,9	3120,58	9,74
112,649	244,410	382,292	388,583	540,063	33,9	35,3	2201,38	9,76
112,249	245,135	384,156	389,792	542,883	33,9	35,8	1586,61	9,89
112,058	245,275	386,379	391,313	545,031	34,1	36,8	1008,93	9,90
111,778	245,447	387,996	392,044	546,286	35,3	38,4	425,82	9,87

Tabela I.56 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
101,452	139,047	189,143	184,218	232,718	20,4	20,5	20464,17	0,00	4,78
100,703	127,871	175,147	170,163	217,032	20,7	20,8	20542,23	1,30	4,41
101,310	125,842	172,678	167,610	214,352	20,9	20,9	20501,65	1,47	4,34
101,988	123,737	169,565	164,755	211,056	20,5	20,6	20433,75	1,72	4,23
101,024	120,609	165,490	160,519	206,238	20,2	20,3	20494,45	2,07	4,15
101,052	119,071	162,682	157,979	202,916	20,4	20,4	20497,01	2,23	4,07
100,221	116,496	159,541	154,637	199,018	20,5	20,6	20562,33	2,40	3,98
101,351	116,078	156,649	152,078	194,834	20,6	20,7	20474,46	2,69	3,90

100,773	113,975	153,268	148,513	190,088	20,9	21,0	20534,45	2,96	3,92
102,288	114,017	149,565	145,114	183,504	20,1	20,2	20413,63	3,34	3,67
103,247	113,652	147,230	142,904	180,240	19,9	20,0	20321,59	3,63	3,59
103,042	112,412	143,079	138,998	173,849	20,5	20,5	20312,73	3,96	3,44
104,025	112,505	140,898	136,883	169,078	20,7	20,7	20283,90	4,20	3,32
104,146	111,686	138,874	134,875	166,017	20,8	20,9	20217,29	4,53	3,24
103,617	111,015	136,557	132,454	161,431	20,9	21,0	20301,63	4,81	3,15
105,174	111,654	134,209	130,134	154,986	20,2	20,3	20113,59	5,32	2,90
105,666	110,870	131,048	126,861	147,370	19,9	19,9	20119,99	5,72	2,66
103,899	108,712	126,060	121,842	138,165	20,1	20,2	20257,70	5,99	2,46
103,080	107,241	122,763	118,351	130,882	20,2	20,3	20312,97	6,31	2,32
101,736	105,118	118,659	113,904	123,257	20,4	20,4	20438,19	6,65	2,17
101,783	104,830	117,495	112,680	120,998	20,4	20,5	20448,45	6,75	2,11
101,564	104,001	116,053	111,081	118,383	20,5	20,5	20466,24	7,03	2,06
101,001	102,787	113,898	108,905	115,163	20,6	20,6	20516,13	7,20	2,11
101,258	102,845	113,006	107,829	112,907	20,7	20,7	20515,66	7,47	2,12
101,311	102,429	112,009	106,615	110,755	20,8	20,8	20476,06	7,94	2,10
101,899	102,401	111,158	105,652	108,860	20,8	20,9	20445,04	8,32	2,03
102,088	102,349	110,444	104,880	107,368	20,9	21,0	20427,26	8,69	2,02
102,492	102,351	110,104	104,325	106,064	20,9	21,0	20391,37	9,06	1,95

Tabela I.57 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
299,163	338,210	387,435	383,342	430,693	20,6	20,7	20483,29	0,00	4,92
300,098	336,405	383,994	379,892	426,244	21,0	21,1	20460,16	1,58	4,75
300,187	331,999	378,818	374,731	420,948	20,3	20,4	20510,17	2,07	4,67
298,746	328,103	374,374	370,183	416,723	20,7	20,7	20610,90	2,44	4,61
299,826	328,364	374,483	370,406	416,989	20,8	20,9	20547,92	2,61	4,57
299,849	326,794	372,627	368,490	414,909	21,0	21,0	20516,77	2,82	4,53
300,184	324,847	370,159	366,105	412,237	20,1	20,3	20523,08	3,26	4,46
300,231	323,089	367,684	363,484	409,042	20,2	20,3	20509,75	3,74	4,39
299,565	321,959	366,221	362,009	407,044	20,4	20,5	20559,95	4,09	4,34
299,824	319,740	363,574	359,301	404,124	20,5	20,6	20550,30	4,51	4,28
299,843	318,505	361,647	357,295	401,538	20,7	20,7	20534,62	4,89	4,20
301,291	318,707	361,642	357,079	400,871	20,9	21,0	20390,08	5,33	4,13
299,852	316,204	358,510	353,650	396,550	20,6	20,8	20530,88	5,75	4,11
300,725	316,025	357,717	352,696	394,772	20,0	20,1	20482,42	6,06	4,03
300,440	315,224	356,234	351,181	392,417	20,2	20,2	20496,68	6,57	3,98
301,328	315,033	354,790	349,832	390,092	20,4	20,4	20382,27	6,84	3,90
300,702	313,711	352,033	347,101	386,218	20,4	20,5	20449,08	7,18	3,82
299,614	311,850	348,893	344,031	381,952	20,6	20,7	20591,25	7,55	3,80
300,306	312,193	349,428	344,526	382,403	20,8	20,8	20481,36	7,95	3,76
299,859	311,386	347,166	342,333	379,135	20,9	21,0	20516,25	8,33	3,70
299,680	310,315	344,561	339,772	375,325	19,8	19,9	20531,73	8,80	3,64
299,497	309,125	341,875	337,068	371,402	20,0	20,1	20571,04	9,47	3,53
300,770	309,893	341,462	336,814	370,018	20,2	20,3	20414,68	9,87	3,45
299,887	308,831	338,939	334,283	366,123	20,4	20,4	20492,99	10,32	3,84

300,249	308,341	337,093	332,430	363,004	20,5	20,6	20530,23	10,61	3,75
298,896	306,379	333,426	328,799	358,159	20,6	20,7	20611,87	11,16	3,68
299,430	306,716	332,667	327,937	355,427	20,7	20,8	20569,86	11,52	3,59
299,924	306,299	331,041	326,309	353,014	20,9	21,0	20532,65	11,89	3,56
299,077	305,763	330,451	325,621	351,502	21,0	21,1	20572,50	12,25	3,58
300,240	306,250	329,539	324,689	349,190	20,2	20,4	20451,70	12,72	3,65
301,589	307,813	328,684	324,247	345,254	20,0	20,1	20312,30	13,05	3,38
301,669	307,315	326,455	321,790	339,513	20,1	20,2	20407,10	13,49	3,04
301,049	306,092	324,459	319,843	336,303	20,2	20,3	20404,72	13,77	3,10
299,273	304,087	320,936	316,192	329,475	20,4	20,4	20553,57	14,31	2,66
301,400	305,726	321,620	316,760	328,421	20,6	20,6	20385,91	14,89	2,48
299,459	303,384	318,146	312,996	322,806	20,8	20,8	20583,56	15,02	2,46
299,284	303,020	317,682	312,543	321,850	20,9	21,0	20561,39	15,32	2,46
299,957	303,245	316,925	311,654	319,746	20,7	20,8	20526,66	15,82	2,38
299,808	302,813	315,906	310,510	317,729	20,1	20,2	20523,19	16,30	2,33
300,306	302,516	314,398	308,832	314,420	19,9	20,0	20500,72	17,33	2,20
300,322	302,399	314,008	308,413	313,594	20,0	20,1	20509,35	17,62	2,26
299,307	301,028	311,896	306,147	310,486	20,2	20,3	20582,16	17,92	2,25
299,486	301,167	311,856	306,128	310,197	20,3	20,4	20555,58	18,20	2,23
300,402	301,633	311,629	305,790	309,248	20,4	20,5	20474,57	19,00	2,18
300,485	301,706	311,838	305,966	309,345	20,6	20,6	20462,47	19,22	2,29
300,140	300,300	309,123	303,011	304,656	20,7	20,7	20502,84	20,56	1,98

Tabela I.58 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,527	539,931	589,187	585,041	632,219	20,4	20,4	20399,21	0,00	4,95
501,990	539,464	587,501	583,346	629,585	20,7	20,8	20399,21	1,97	4,85
499,321	534,789	581,742	577,661	623,195	20,9	21,0	20720,66	2,50	4,77
501,065	535,422	582,411	578,258	624,537	21,1	21,2	20550,98	2,74	4,72
499,768	531,201	577,470	573,370	619,570	20,2	20,3	20649,89	3,46	4,66
501,209	531,055	577,067	572,938	619,020	19,9	20,0	20558,53	3,93	4,60
500,529	527,550	572,935	568,858	614,493	20,2	20,3	20614,74	4,60	4,48
501,839	528,217	573,541	569,336	614,984	20,6	20,7	20466,65	5,00	4,44
500,543	525,244	570,140	565,886	611,151	20,9	20,9	20594,96	5,56	4,41
500,745	523,150	567,231	562,913	607,303	20,4	20,5	20580,73	6,58	4,33
501,112	522,172	565,954	561,484	605,741	19,8	19,9	20535,21	7,05	4,29
500,491	520,917	564,531	559,997	603,783	19,9	20,0	20611,29	7,45	4,30
501,037	520,526	563,795	559,103	602,348	20,2	20,2	20561,50	8,05	4,24
499,735	518,395	561,264	556,360	598,948	20,4	20,4	20654,66	8,56	4,24
503,427	521,040	563,721	558,523	600,736	21,0	21,1	20286,32	9,12	4,16
500,898	517,398	559,485	554,264	595,719	20,9	21,0	20523,97	9,65	4,11
500,498	516,464	558,242	552,973	593,966	20,2	20,4	20570,74	10,12	4,06
501,173	516,482	557,169	551,982	591,627	20,2	20,2	20519,64	10,67	3,97
499,395	513,923	554,315	549,117	588,275	20,3	20,3	20700,47	11,21	3,96
502,890	516,613	555,709	550,472	588,406	20,5	20,6	20322,93	11,96	3,85
501,092	514,483	552,799	547,581	584,844	20,7	20,7	20511,68	12,31	3,80
499,800	512,708	550,050	544,887	581,330	20,8	20,9	20630,09	12,98	3,76

501,702	513,732	550,478	545,301	581,053	20,9	21,0	20454,76	13,64	3,70
500,328	511,870	547,778	542,676	578,088	21,0	21,1	20591,48	13,98	3,67
500,989	512,348	546,514	541,434	575,115	20,7	20,8	20507,22	14,94	3,59
499,726	510,208	543,214	538,155	571,150	20,1	20,3	20638,27	15,60	3,54
502,314	512,995	545,510	540,399	572,659	20,1	20,2	20369,10	15,91	3,48
500,874	510,861	542,492	537,511	569,137	20,3	20,3	20497,27	16,60	3,44
500,304	509,358	539,157	534,198	564,840	20,4	20,5	20589,91	17,31	3,39
499,684	508,852	538,426	533,395	563,616	20,6	20,7	20620,80	17,63	3,39
500,080	509,032	537,747	532,804	562,172	20,8	20,9	20603,07	18,06	3,32
502,148	510,143	537,825	532,855	561,286	20,9	21,0	20431,93	18,57	3,23
501,889	510,208	537,763	532,716	560,425	21,1	21,2	20407,61	18,82	3,22
501,082	508,854	535,517	530,552	558,135	20,3	20,4	20520,35	19,33	3,19
500,616	508,230	534,157	529,193	556,102	20,0	20,1	20586,06	19,67	3,16
500,434	507,831	533,701	528,784	555,922	20,1	20,2	20573,73	20,06	3,16
499,950	507,223	531,828	526,821	551,792	20,3	20,3	20589,12	20,79	3,07
499,745	506,399	529,731	524,677	548,311	20,4	20,5	20664,12	21,19	3,01
500,620	506,883	526,825	522,167	541,183	20,9	20,9	20544,24	22,04	3,73
499,681	505,341	524,353	519,567	536,624	21,0	21,0	20609,50	22,84	3,83
500,842	506,222	524,217	519,425	534,221	21,0	21,1	20528,81	23,52	3,55
500,465	505,102	521,738	516,738	528,944	20,4	20,6	20584,77	24,53	3,32
501,221	505,391	521,047	515,858	526,240	20,0	20,1	20528,02	25,59	3,45
500,226	503,995	518,552	513,168	521,706	20,1	20,1	20596,11	26,53	3,38
499,386	502,308	515,548	509,983	516,296	20,2	20,2	20662,53	27,81	3,25
500,182	502,366	514,294	508,504	513,287	20,3	20,4	20627,89	29,19	2,92
500,725	502,138	513,013	507,027	510,360	20,4	20,5	20532,08	31,33	2,96
500,540	501,342	511,135	504,965	507,110	20,5	20,6	20563,51	32,67	2,84
499,850	500,085	508,892	502,516	503,169	20,6	20,7	20639,37	34,53	2,92

Tabela I.59 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
701,200	740,458	789,764	785,244	832,142	20,2	20,2	20516,83	0,00	4,58
700,734	739,447	787,625	783,206	829,179	20,7	20,8	20558,56	2,00	4,52
698,468	735,059	782,010	777,625	822,765	21,0	21,0	20933,30	2,91	4,49
698,842	734,262	781,215	776,821	822,384	20,7	20,9	20648,02	3,70	4,42
699,921	733,773	780,559	776,151	822,220	20,0	20,0	20599,08	4,13	4,38
700,863	732,598	779,153	774,699	820,627	20,2	20,2	20498,26	4,90	4,30
700,491	730,850	776,871	772,446	818,186	20,4	20,4	20521,50	5,38	4,21
699,891	727,967	773,399	769,093	814,461	20,5	20,6	20585,29	6,20	4,22
699,995	726,456	771,516	767,163	812,317	20,7	20,7	20505,66	7,08	4,18
699,519	724,154	768,422	764,039	808,621	21,1	21,2	20578,14	8,08	4,12
699,645	723,512	767,523	763,099	807,571	21,1	21,2	20520,41	8,59	4,08
699,658	722,295	766,059	761,529	805,478	20,4	20,5	20574,82	9,47	4,05
700,052	721,024	764,348	759,705	803,453	20,2	20,3	20503,06	10,24	3,98
700,669	720,763	763,698	758,980	802,010	20,4	20,5	20432,53	11,21	3,92
700,816	719,719	762,330	757,525	800,000	20,6	20,6	20397,34	12,06	3,89
701,135	719,236	761,381	756,299	797,876	20,9	21,0	20369,85	13,18	3,80
699,815	716,615	758,264	752,964	793,586	21,1	21,2	20530,39	14,14	3,76

700,202	716,571	757,860	752,451	792,413	21,2	21,3	20534,12	14,51	3,73
700,773	716,852	757,693	752,146	791,179	20,6	20,7	20452,53	15,15	3,70
699,662	714,313	754,182	748,614	786,790	19,9	20,0	20614,53	16,40	3,66
700,069	714,071	753,162	747,539	784,720	20,0	20,1	20521,45	17,28	3,58
699,858	713,330	751,712	746,091	782,569	20,1	20,2	20520,91	18,17	3,56
700,196	713,624	750,733	745,261	780,690	20,5	20,5	20498,39	18,81	3,51
699,204	711,553	747,943	742,391	776,905	20,6	20,7	20556,75	19,66	3,44
700,265	712,133	747,377	741,805	775,452	20,9	20,9	20480,73	20,66	3,36
700,609	712,205	746,779	741,249	774,194	21,2	21,3	20395,16	21,36	3,33
698,097	709,092	741,623	736,087	767,977	21,0	21,1	20657,39	22,07	3,27
699,327	710,449	743,212	737,807	769,435	20,4	20,5	20551,60	22,40	3,25
700,584	711,302	743,453	738,003	769,133	20,1	20,1	20478,39	23,00	3,24
700,626	711,010	742,654	737,197	768,020	20,3	20,3	20442,43	23,40	3,22
700,166	709,908	740,412	735,029	765,107	20,5	20,6	20546,57	24,00	3,30
699,193	708,841	738,550	733,204	762,997	20,7	20,8	20603,77	24,81	3,55
699,992	709,639	739,038	733,622	762,586	21,2	21,3	20426,49	25,44	3,81
699,682	708,799	737,173	731,690	760,298	20,9	21,0	20460,82	26,04	3,75
699,111	707,991	736,052	730,623	758,296	20,4	20,5	20565,86	26,70	3,76
698,865	707,868	735,324	729,905	757,358	20,2	20,2	20565,87	27,06	3,72
700,256	708,362	734,078	728,828	754,745	20,6	20,7	20456,01	28,28	3,61

Tabela I.60 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 27400 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,479	134,447	172,060	168,797	206,348	20,0	20,1	27441,76	0,00	4,74
101,541	130,611	166,873	163,591	200,626	20,4	20,4	27375,73	1,02	4,77
101,475	126,227	162,226	158,903	195,868	20,8	20,8	27391,75	1,23	4,72
100,051	110,749	145,767	142,559	178,006	20,6	20,7	27432,70	1,79	4,46
100,719	105,593	139,355	136,049	171,232	19,9	20,0	27382,07	2,20	4,30
100,294	101,497	133,235	129,760	164,757	19,8	19,8	27428,53	2,47	4,10
102,251	102,196	131,279	127,445	162,088	20,1	20,1	27283,16	2,83	4,06
102,015	99,910	123,021	118,068	149,986	20,4	20,5	27298,79	3,17	3,74
101,231	97,460	109,005	102,088	118,834	20,8	20,9	27324,49	3,62	3,14
102,490	98,413	108,026	100,475	108,627	20,7	20,8	27256,14	3,77	2,87

Tabela I.61 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 27400 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
300,257	334,782	372,057	368,963	406,488	20,2	20,2	27416,14	0,00	5,12
300,329	334,029	370,931	367,799	405,137	20,0	20,0	27396,74	0,80	4,92
300,839	333,085	369,338	366,257	403,064	20,3	20,4	27349,20	1,52	4,79
299,432	329,535	365,295	362,158	398,648	20,9	21,0	27464,78	1,97	4,84
299,819	326,497	362,040	358,786	395,280	21,1	21,2	27426,13	2,46	4,81
300,735	325,425	360,899	357,696	394,297	20,7	20,8	27380,75	2,71	4,77



300,184	321,352	356,642	353,301	389,847	20,3	20,4	27431,42	3,04	4,87
300,703	319,376	354,642	351,249	387,495	19,9	20,0	27425,31	3,28	4,64
300,799	315,939	351,070	347,641	383,622	20,2	20,2	27435,03	3,64	4,92
299,619	310,869	345,585	342,078	377,408	20,3	20,4	27506,13	4,02	4,62
302,039	310,807	345,713	342,211	377,305	20,7	20,8	27374,44	4,36	4,56
300,110	306,559	340,672	337,066	371,775	21,0	21,0	27491,21	4,68	4,53
300,561	305,154	338,936	335,238	369,728	20,8	20,9	27443,22	5,01	4,40
299,401	302,299	335,494	331,635	365,800	20,4	20,5	27428,78	5,34	4,31
301,663	303,067	335,483	331,405	365,419	20,0	20,1	27290,61	5,75	4,21
300,780	300,700	332,272	327,915	361,398	19,7	19,8	27335,94	6,12	4,17
299,427	297,032	327,395	322,526	355,481	20,1	20,1	27431,62	6,58	4,10
300,743	297,613	326,619	321,481	354,005	20,5	20,5	27332,49	6,98	3,96
300,755	297,045	324,158	318,962	351,288	20,7	20,8	27361,55	7,29	3,98
299,654	295,061	320,190	314,661	346,049	20,9	21,0	27377,38	7,58	3,90
301,225	296,752	320,151	314,403	345,298	21,1	21,2	27275,47	8,02	3,84
298,447	292,352	311,064	304,421	323,784	20,2	20,3	27448,09	8,66	3,47
300,860	295,090	312,109	305,186	321,351	19,8	19,9	27314,81	8,96	3,29
299,496	293,412	308,559	301,437	314,806	19,8	19,9	27367,30	9,23	3,20
299,618	292,967	306,375	298,890	309,653	20,1	20,1	27372,46	9,46	3,08
300,796	293,856	304,829	296,903	303,665	20,3	20,3	27278,42	9,97	2,93
299,993	292,505	300,631	292,255	295,219	20,5	20,5	27355,08	10,37	2,69

Tabela I.62 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 27400 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,015	534,456	574,363	570,826	608,018	20,6	20,7	27344,53	0,00	5,17
499,409	531,896	571,327	567,713	604,398	20,1	20,2	27477,92	0,97	5,16
501,172	532,592	571,655	567,906	604,426	20,2	20,3	27357,63	2,07	5,07
499,662	530,355	569,048	565,161	602,227	20,1	20,2	27442,62	2,43	5,14
499,394	528,424	566,903	562,885	599,621	20,5	20,6	27465,54	3,03	5,06
500,359	528,812	567,205	563,193	599,897	20,9	21,0	27399,56	3,34	5,07
500,681	529,530	565,622	561,948	598,513	20,7	20,8	27381,29	3,81	5,01
499,352	527,102	562,800	559,034	595,247	20,2	20,3	27482,19	4,08	5,04
501,239	527,840	563,661	559,928	596,241	19,8	19,9	27345,13	4,49	5,00
499,490	523,358	558,763	555,042	590,859	20,1	20,1	27470,43	4,88	5,01
501,608	522,396	557,684	554,097	590,037	20,4	20,4	27331,51	5,22	4,93
499,608	516,819	551,918	548,142	583,501	20,6	20,6	27477,58	5,72	4,89
501,276	517,736	553,121	549,184	584,488	21,1	21,1	27368,00	6,00	4,86
501,221	514,411	549,787	545,595	580,588	20,5	20,6	27382,27	6,60	4,79
498,429	508,874	544,007	539,609	574,099	20,1	20,2	27513,16	6,96	4,76
500,563	509,553	544,701	540,399	574,727	19,8	19,9	27397,26	7,36	4,68
500,005	506,608	540,863	536,526	570,388	20,3	20,3	27425,85	7,99	4,64
500,302	505,740	539,850	535,439	569,240	20,6	20,6	27408,62	8,36	4,59
500,303	504,678	538,354	533,835	567,311	20,8	20,8	27416,76	8,83	4,54
501,252	504,602	537,734	533,255	566,555	21,0	21,1	27362,60	9,05	4,46
500,132	501,916	534,183	529,664	562,587	21,2	21,2	27417,47	9,59	4,43
501,245	501,949	533,564	528,939	561,710	20,8	20,9	27367,23	9,98	4,42
499,438	498,071	529,255	524,502	556,553	20,5	20,6	27482,63	10,58	4,36



500,799	498,592	528,882	523,878	555,690	20,1	20,2	27369,23	11,15	4,26
500,751	497,683	526,941	521,649	553,194	20,4	20,4	27356,28	11,60	4,21
500,108	496,448	524,500	519,202	550,329	20,7	20,7	27408,58	12,01	4,18
499,068	494,631	520,865	515,288	545,574	20,8	20,9	27505,22	12,43	4,13
501,841	498,957	523,367	517,642	543,140	20,6	20,7	27255,23	12,84	3,93
500,311	496,210	520,501	514,692	539,890	20,0	20,1	27379,90	13,18	3,98
499,634	494,596	516,361	510,332	534,749	20,2	20,2	27415,88	13,82	3,85
501,177	496,324	516,555	510,219	531,275	20,6	20,6	27318,79	14,27	3,73
500,684	495,521	514,833	508,328	528,128	20,8	20,8	27351,33	14,57	3,70
500,052	493,653	510,198	503,341	519,849	20,4	20,5	27388,38	15,28	3,81
500,770	494,412	508,845	501,743	513,724	19,8	19,9	27326,32	15,93	3,57
497,798	490,387	502,048	494,420	502,046	20,9	21,0	27437,38	16,57	2,83
497,758	490,401	501,552	493,770	500,441	20,0	20,0	27387,73	16,70	2,74

Tabela I.63 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 =$

$$800 \text{ kPa}, \dot{m}_{L,1,0,BEP} = 27400 \text{ kg/h}, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
698,298	731,472	771,392	767,515	804,516	20,1	20,1	27355,84	0,00	4,86
698,479	730,743	769,906	765,951	802,415	20,6	20,6	27369,04	1,87	4,77
697,562	729,153	768,047	764,064	800,274	21,1	21,1	27414,62	2,42	4,75
701,675	732,636	771,332	767,307	803,417	20,6	20,7	27396,05	3,08	4,74
698,232	727,968	766,098	761,868	797,500	20,0	20,1	27631,91	3,66	4,71
700,903	729,666	767,775	763,723	799,524	20,6	20,6	27480,21	4,34	4,68
701,702	729,486	767,377	763,206	799,209	21,0	21,0	27436,81	4,92	4,63
701,038	728,221	763,387	759,664	795,224	20,6	20,7	27476,69	6,04	4,59
699,459	725,312	760,416	756,726	792,278	20,2	20,3	27402,42	6,57	4,56
700,038	721,757	756,527	752,992	788,362	20,1	20,1	27378,55	7,14	4,51
698,000	716,233	750,747	746,941	781,723	20,3	20,4	27512,98	7,89	4,44
699,992	717,241	752,030	748,311	783,056	20,5	20,6	27370,08	8,31	4,39
700,944	715,105	749,435	745,856	780,349	20,7	20,8	27313,06	9,14	4,33
699,879	710,353	744,269	740,506	774,125	20,9	21,0	27597,91	9,88	4,27
701,711	710,850	744,556	740,764	774,371	21,1	21,1	27452,21	10,59	4,20
699,880	706,672	739,878	736,115	769,433	21,2	21,3	27329,95	11,43	4,12
699,404	704,400	737,356	733,491	766,518	20,6	20,7	27395,89	12,06	4,08
699,947	703,921	736,150	732,111	764,698	20,0	20,1	27440,80	12,72	4,07
699,982	703,201	735,109	731,036	763,472	20,1	20,1	27406,49	13,02	4,02
699,185	701,324	732,829	728,656	760,834	20,2	20,3	27471,55	13,38	4,01
700,122	701,546	732,349	727,880	759,784	20,6	20,6	27462,20	13,81	3,95
698,933	697,709	727,407	722,758	753,621	20,8	20,9	27504,20	14,72	3,88
699,609	697,813	727,315	722,388	753,489	20,9	21,0	27401,65	15,47	3,80
699,489	697,459	726,871	721,812	752,689	20,5	20,6	27415,85	15,76	3,79
700,986	700,730	729,271	723,975	753,201	21,0	21,0	27262,73	16,72	3,78
700,023	697,370	725,406	720,056	748,373	21,1	21,2	27293,73	17,42	3,73
700,949	698,007	724,264	718,800	746,056	20,8	20,9	27226,04	18,21	3,68
699,657	695,014	719,403	713,684	740,381	20,0	20,1	27315,69	19,27	3,67
699,491	694,739	717,479	711,162	733,909	20,2	20,3	27340,15	19,86	3,52
699,365	693,645	713,602	706,923	726,566	20,4	20,5	27316,91	21,07	3,42
699,196	692,350	709,630	702,586	717,911	20,6	20,7	27368,99	22,12	3,24

700,321	693,411	709,571	702,291	715,776	20,8	20,9	27277,83	22,89	3,16
699,647	692,057	705,787	698,076	708,606	21,0	21,0	27299,05	23,94	3,11
700,225	692,640	703,653	695,528	701,841	20,9	21,0	27242,59	24,54	3,00
698,825	690,560	699,915	691,411	695,142	20,4	20,6	27339,21	25,52	2,85
699,147	690,183	696,742	687,701	687,875	20,1	20,2	27358,74	26,37	2,65

Tabela I.64 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,479	119,898	146,413	139,714	161,859	20,8	20,8	34222,91	0,00	4,59
100,787	115,248	139,942	132,924	153,760	20,2	20,2	34156,02	0,99	4,45
101,030	91,203	113,126	105,354	122,929	20,4	20,5	34134,47	1,82	3,98
100,534	82,068	101,637	93,122	108,286	20,7	20,7	34157,05	2,23	3,77
102,118	79,956	96,633	87,298	100,241	20,9	21,0	34067,65	2,62	3,45
104,980	79,775	89,156	78,160	86,078	20,1	20,2	33961,91	3,06	3,15
112,014	86,768	88,667	76,559	62,339	20,5	20,6	33622,13	3,36	2,60

Tabela I.65 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
299,944	320,308	346,393	339,901	361,443	20,6	20,7	34208,43	0,00	4,64
300,537	317,992	343,028	336,278	356,836	20,7	20,8	34193,51	1,40	4,55
299,450	314,222	338,021	331,041	350,534	20,0	20,1	34272,46	2,14	4,48
300,025	313,203	336,776	329,708	348,599	20,4	20,5	34236,82	2,57	4,46
300,525	310,560	333,638	326,399	344,666	20,6	20,7	34199,07	3,10	4,40
300,644	307,241	329,812	322,533	340,296	21,0	21,1	34197,67	3,45	4,32
300,961	302,651	324,873	317,535	334,758	20,1	20,2	34174,94	3,84	4,22
300,352	298,369	320,150	312,640	329,302	20,5	20,5	34191,93	4,14	4,14
300,081	292,485	313,627	305,954	321,674	20,7	20,7	34204,42	4,60	3,99
300,845	289,459	310,254	302,453	317,687	20,9	20,9	34153,64	4,96	3,88
301,346	287,922	308,280	300,364	315,155	21,1	21,1	34150,03	5,25	3,81
300,022	284,108	303,948	295,848	310,051	21,2	21,2	34192,01	5,47	3,73
300,068	282,026	301,415	293,109	306,883	20,5	20,6	34200,09	5,76	3,66
299,001	278,604	297,254	288,767	301,707	19,8	19,9	34271,24	6,12	3,56
298,938	276,657	294,239	285,381	297,370	20,1	20,1	34266,87	6,60	3,46
299,877	276,690	293,643	284,508	296,032	20,2	20,3	34206,10	6,90	3,42
299,884	274,412	288,869	278,832	288,500	20,5	20,5	34221,34	7,47	3,26
300,347	273,979	287,609	277,123	286,216	20,6	20,6	34187,84	7,79	3,17
301,740	274,419	286,907	275,945	284,054	20,7	20,8	34119,46	8,22	3,09
301,457	272,759	280,117	268,094	271,919	20,9	21,0	34139,29	8,68	2,85
299,712	269,981	270,308	256,786	252,655	21,0	21,1	34239,38	9,19	2,43

Tabela I.66 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,518	521,070	547,416	540,732	562,054	20,0	20,1	34190,91	0,00	5,00
501,069	520,677	546,634	540,003	560,757	20,6	20,6	34146,26	1,21	4,88
500,181	518,029	543,409	536,407	556,619	20,8	20,8	34193,97	2,05	4,81
498,810	515,897	540,736	533,737	553,459	21,0	21,0	34257,24	2,34	4,73
499,078	515,412	539,934	532,907	552,216	20,9	21,0	34271,94	2,78	4,65
501,913	517,865	542,349	535,488	554,819	20,5	20,5	34173,97	3,11	4,62
500,782	515,803	539,620	532,418	551,237	20,9	20,9	34255,73	3,59	4,60
501,485	516,523	540,317	533,297	551,901	21,1	21,2	34220,11	3,82	4,57
499,594	513,239	536,519	529,374	547,416	21,3	21,4	34296,16	4,16	4,53
501,444	513,609	536,986	529,651	547,743	20,3	20,4	34225,99	4,60	4,51
500,779	511,894	534,682	527,285	545,008	20,2	20,2	34278,06	4,97	4,49
499,959	508,587	531,083	523,467	540,531	20,7	20,7	34298,60	5,54	4,44
501,533	508,338	530,893	523,364	540,409	21,0	21,0	34220,50	5,86	4,39
499,921	504,017	525,963	518,271	534,701	20,6	20,7	34275,98	6,29	4,30
502,038	504,312	526,408	518,537	535,134	20,1	20,2	34209,91	6,66	4,28
500,360	500,127	521,794	513,785	529,662	20,4	20,4	34289,76	6,96	4,20
501,624	498,986	520,570	512,506	528,277	20,6	20,6	34226,80	7,34	4,14
501,479	495,903	517,321	509,110	524,594	20,8	20,8	34219,23	7,79	4,08
500,781	491,729	512,627	504,345	519,012	21,1	21,2	34254,35	8,26	3,97
500,230	489,971	511,055	502,409	517,023	20,0	20,1	34276,51	8,39	3,94
500,211	485,999	506,495	497,455	511,433	20,3	20,4	34266,52	9,19	3,81
500,488	484,157	504,405	495,083	508,469	20,5	20,6	34246,31	9,66	3,74
502,229	483,995	503,747	494,444	507,116	20,8	20,8	34150,63	10,29	3,65
502,333	482,093	501,707	492,115	504,218	21,1	21,2	34163,50	10,78	3,59
501,318	479,293	497,607	487,808	498,677	20,9	21,1	34205,82	11,46	3,50
500,465	477,004	494,530	484,370	494,577	20,5	20,7	34231,04	11,99	3,43
502,001	477,484	493,404	482,994	492,566	20,1	20,2	34182,13	12,57	3,35
500,774	474,722	489,057	478,448	486,570	20,3	20,4	34269,29	13,14	3,28
501,516	474,778	487,881	476,877	484,312	20,5	20,5	34220,47	13,68	3,19
500,364	471,963	483,254	471,878	477,705	20,6	20,7	34298,92	14,33	3,10

Tabela I.67 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
700,923	722,674	748,718	741,978	762,838	20,4	20,4	34192,65	0,00	4,87
701,493	722,114	747,519	740,860	761,096	20,8	20,8	34174,51	1,72	4,79
699,160	718,806	743,833	736,759	756,253	21,1	21,1	34279,16	2,46	4,79
701,178	719,554	744,603	737,577	757,074	20,3	20,4	34167,65	3,17	5,30
699,755	716,318	740,932	733,730	752,452	20,3	20,3	34278,58	4,04	5,03
700,197	715,730	739,964	732,677	751,288	20,8	20,8	34207,52	4,69	4,98
700,810	715,663	739,720	732,624	750,979	21,0	21,0	34184,89	4,99	4,92
699,135	712,515	735,678	728,358	746,211	21,2	21,2	34246,10	5,72	4,86

699,992	712,478	735,439	728,049	745,456	20,6	20,7	34215,70	6,52	4,87
699,547	710,817	733,435	725,968	742,994	20,1	20,2	34249,67	7,00	4,85
698,600	706,795	728,599	720,916	736,909	20,2	20,3	34313,66	8,17	4,77
700,479	706,737	728,595	720,873	737,020	20,5	20,5	34193,57	8,78	4,70
700,547	705,171	726,801	719,100	734,956	20,7	20,7	34156,57	9,28	4,61
701,077	701,482	722,787	714,875	730,161	20,9	21,0	34155,33	10,13	4,60
699,330	696,748	717,436	709,418	723,893	21,1	21,2	34244,78	10,73	4,60
701,040	696,391	717,191	709,122	723,793	21,3	21,3	34143,02	11,22	4,55
699,834	691,074	711,263	702,932	716,781	20,8	20,9	34230,24	12,11	4,36
700,820	689,706	709,765	701,322	714,836	20,4	20,5	34157,60	12,74	4,28
700,626	687,084	706,798	698,286	711,423	20,1	20,2	34184,99	13,23	4,27
700,090	684,827	703,994	695,269	707,760	20,4	20,5	34234,18	13,96	4,19
700,252	683,060	701,855	693,098	705,163	20,7	20,7	34195,22	14,59	4,08
698,344	679,379	697,234	688,059	699,156	20,9	20,9	34289,61	15,38	3,98
701,392	680,952	698,858	689,741	700,962	21,1	21,1	34132,95	15,93	3,97
699,470	678,081	695,392	685,951	696,168	21,3	21,3	34235,20	16,40	3,92
700,549	677,121	693,822	683,942	693,495	20,4	20,6	34183,70	17,58	3,81
698,423	673,226	688,453	677,919	686,005	20,4	20,5	34296,23	18,42	3,70
701,298	675,898	690,910	680,339	688,469	20,6	20,6	34170,46	18,91	3,71
700,504	673,643	687,842	677,020	684,356	20,8	20,9	34178,39	19,67	3,64
701,478	674,136	685,893	674,631	680,412	21,0	21,0	34162,90	20,41	3,51
700,281	671,473	681,835	670,231	674,421	21,1	21,2	34205,28	21,29	3,38
700,461	670,867	680,153	668,356	672,182	21,3	21,3	34197,39	21,96	3,31
702,438	672,790	679,930	667,725	669,794	21,1	21,3	34100,10	22,62	3,25

Tabela I.68 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
101,400	162,319	238,804	232,926	307,364	20,3	20,3	25532,28	0,00	7,67
102,086	154,450	227,723	221,949	294,545	21,0	21,0	25530,15	1,43	7,37
101,155	139,198	210,080	204,581	276,450	20,0	20,1	25553,40	2,15	7,00
101,090	135,080	204,970	199,583	271,447	20,3	20,3	25556,30	2,34	6,98
100,785	133,768	202,946	197,619	269,597	20,6	20,7	25561,49	2,53	6,92
100,805	129,116	197,173	191,096	262,236	20,8	20,9	25586,85	2,90	6,73
104,006	131,828	195,807	190,126	259,303	20,0	20,1	25366,49	3,19	6,56
107,721	131,855	189,656	184,419	248,366	20,2	20,2	25160,66	3,76	6,37
105,079	125,069	177,072	172,249	231,163	20,4	20,5	25270,92	4,32	6,00
103,337	119,745	164,296	159,764	211,404	20,6	20,7	25442,14	4,79	5,52
104,258	117,167	153,493	149,045	190,816	20,9	20,9	25360,80	5,38	5,08
101,527	110,119	140,614	135,993	172,548	20,3	20,4	25528,03	6,22	4,74
107,121	114,674	141,252	136,772	166,124	20,5	20,5	25163,51	6,65	4,58
104,144	111,137	135,021	130,342	153,920	20,9	21,0	25365,25	7,22	4,15
102,744	108,394	130,015	125,284	145,382	20,4	20,5	25452,08	7,60	3,92
101,648	106,089	123,628	118,218	131,849	20,1	20,2	25503,33	8,38	3,61
100,698	103,898	118,552	112,687	122,463	20,3	20,3	25556,35	8,86	3,49
101,894	103,901	116,434	110,412	117,533	20,4	20,4	25490,51	9,61	3,25
101,465	101,713	111,643	105,025	108,780	20,6	20,7	25517,90	10,41	2,94

Tabela I.69 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
301,257	362,360	438,883	432,953	507,098	21,2	21,4	25513,25	0,00	7,51
300,362	360,633	435,555	429,788	502,939	20,5	20,5	25568,49	1,22	7,48
300,578	359,478	433,386	427,616	500,035	20,8	20,8	25568,29	1,97	7,41
300,391	356,414	429,771	423,936	496,466	19,9	20,0	25457,23	2,55	7,42
298,986	351,829	424,319	418,396	490,733	20,3	20,3	25563,69	2,98	7,31
301,013	349,563	421,569	415,752	488,440	20,7	20,8	25379,56	3,45	7,20
299,402	342,056	413,125	407,256	479,123	21,1	21,2	25521,52	4,05	6,99
300,149	340,741	411,445	405,504	477,251	20,2	20,4	25489,19	4,44	6,93
300,985	338,658	409,070	402,913	474,328	20,1	20,2	25520,37	4,79	6,86
302,111	337,742	407,483	401,409	472,539	20,3	20,4	25439,30	5,24	6,89
300,534	333,018	402,061	395,707	466,098	20,6	20,7	25553,54	5,80	6,70
300,240	330,910	399,581	393,088	463,155	20,4	20,5	25539,58	6,17	6,63
300,380	329,759	398,099	391,607	461,442	20,7	20,8	25527,70	6,58	6,60
301,841	332,822	399,794	393,453	462,189	21,0	21,0	25428,72	7,27	6,70
300,100	326,632	390,604	384,340	451,317	20,9	21,0	25547,27	7,76	6,43
299,086	324,173	386,669	380,628	445,998	20,0	20,1	25635,59	8,24	6,32
300,187	323,652	383,754	377,695	441,619	20,2	20,3	25546,87	8,69	6,31
300,424	321,778	380,322	374,406	436,982	20,4	20,5	25536,07	9,37	6,09
300,900	319,664	375,807	370,069	430,750	20,7	20,8	25444,37	10,26	5,89
301,223	317,793	370,570	364,932	422,901	21,4	21,5	25416,52	10,88	5,92
298,742	314,995	365,222	359,614	415,292	22,0	22,0	25532,73	11,43	5,74
300,732	315,755	363,936	358,387	412,127	21,6	21,8	25408,44	12,00	5,53
300,819	313,944	359,316	353,840	405,122	21,3	21,4	25370,06	12,40	5,41
299,097	311,381	354,549	349,117	398,443	20,9	21,0	25475,53	13,13	5,30
299,874	310,663	349,790	344,226	388,372	20,6	20,7	25446,64	13,91	5,01
299,550	310,374	348,994	343,556	387,897	20,4	20,5	25429,27	14,22	5,01
302,577	312,813	348,074	342,776	382,763	20,7	20,8	25218,38	14,74	4,86
302,881	312,650	346,239	340,860	379,616	20,9	21,0	25388,04	15,39	4,85
301,485	310,697	338,747	333,737	363,259	21,1	21,2	25449,22	16,38	4,42
301,670	310,259	337,744	332,860	359,192	21,2	21,3	25455,35	16,95	4,38
300,769	308,554	332,446	327,217	347,663	21,4	21,5	25530,04	17,73	4,16
300,410	307,335	330,167	324,808	342,726	20,7	20,9	25574,14	18,40	4,07
300,237	306,550	327,479	321,803	337,048	19,9	20,0	25575,17	19,01	3,94
300,245	305,902	325,019	319,145	331,847	19,9	20,0	25583,68	19,54	3,75
300,082	305,283	323,302	317,207	328,360	20,2	20,3	25583,48	20,04	3,68
301,638	306,227	323,563	317,395	327,865	20,3	20,4	25487,62	20,53	3,63
300,915	305,098	321,707	315,382	324,683	20,6	20,7	25509,09	21,04	3,57
301,402	305,280	321,098	314,771	323,532	20,8	20,9	25490,93	21,29	3,58
301,061	304,430	319,405	312,830	320,253	21,0	21,0	25502,32	21,89	3,51
300,651	303,311	317,217	310,490	316,733	20,9	21,0	25549,48	22,32	3,31
301,711	304,241	317,903	311,149	317,093	21,1	21,1	25465,84	22,89	3,38
301,417	303,112	315,490	308,505	312,808	21,1	21,3	25478,47	23,68	3,25
300,738	301,964	313,753	306,526	310,193	20,5	20,6	25549,09	23,99	3,21
300,093	301,274	312,642	305,379	308,383	19,9	20,0	25594,14	24,38	3,10

Tabela I.70 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,324	561,718	638,160	632,142	705,940	20,5	20,6	25545,25	0,00	7,86
499,706	560,181	634,734	628,964	701,539	21,2	21,3	25570,32	1,97	7,83
499,286	558,907	632,845	626,981	699,035	21,1	21,2	25624,70	2,69	7,85
500,373	559,040	632,769	626,916	698,906	20,5	20,6	25558,31	3,10	7,74
498,881	555,739	628,380	622,696	694,097	20,1	20,2	25717,19	3,73	7,73
499,708	553,393	625,671	619,767	691,572	20,7	20,8	25510,72	4,63	7,51
500,425	552,595	624,632	618,751	690,742	21,0	21,1	25443,92	4,95	7,46
499,649	547,873	619,476	613,563	685,231	20,7	20,8	25488,14	5,59	7,31
500,322	545,784	616,734	610,841	682,348	20,1	20,2	25460,06	6,24	7,18
499,313	543,202	613,883	607,723	678,753	20,0	20,1	25558,64	6,63	7,18
500,247	541,446	611,849	605,806	676,683	20,2	20,2	25476,92	7,11	7,18
500,698	538,699	608,426	602,180	672,650	20,5	20,6	25419,00	8,07	6,98
500,292	536,782	606,252	599,709	669,829	20,9	21,0	25439,52	8,64	7,02
499,762	534,476	603,432	596,869	666,621	21,2	21,2	25498,37	9,02	7,03
500,041	533,445	601,937	595,428	664,939	21,1	21,2	25465,24	9,54	6,83
499,965	532,046	600,080	593,561	662,658	20,0	20,2	25464,83	10,12	6,82
501,742	534,608	601,451	594,926	662,907	20,7	20,7	25531,50	10,68	6,75
500,234	530,721	596,223	589,800	656,370	21,0	21,1	25623,96	11,49	6,63
499,239	529,299	594,784	588,370	654,626	21,3	21,3	25703,07	12,01	6,65
499,649	527,811	592,347	585,922	651,802	20,2	20,2	25497,87	12,60	6,61
499,117	525,954	588,637	582,337	646,537	20,4	20,5	25548,13	13,59	6,54
498,683	523,917	585,538	579,170	642,248	20,7	20,7	25553,71	14,40	6,50
497,853	520,800	581,133	574,834	636,472	20,4	20,6	25635,15	15,28	6,58
499,089	521,345	579,577	573,422	633,395	20,0	20,1	25525,07	16,22	6,39
497,951	518,947	577,047	570,830	630,602	20,7	20,8	25620,68	16,52	6,30
499,367	519,009	574,120	568,002	625,419	20,5	20,7	25502,65	17,88	6,13
501,235	519,775	573,265	567,234	623,472	19,8	20,0	25380,93	18,58	6,04
500,471	518,394	571,383	565,334	620,904	20,2	20,3	25428,17	18,94	6,02
503,259	520,226	571,838	565,868	620,193	20,5	20,6	25428,00	19,63	5,92
501,108	515,879	563,011	557,012	607,387	20,8	20,9	25581,36	21,08	5,73
505,884	519,782	564,639	558,861	607,356	21,2	21,3	25232,23	22,04	5,54
504,086	517,615	561,668	555,895	603,527	19,9	20,0	25386,89	22,83	5,56
503,208	515,981	558,286	552,352	597,827	19,9	20,0	25416,12	23,59	5,32
500,388	512,080	552,285	546,192	589,844	20,4	20,5	25633,84	24,71	5,30
501,239	512,860	546,446	541,300	579,040	20,9	21,0	25585,87	25,62	4,96
502,174	513,374	548,367	542,863	580,938	20,9	21,1	25497,18	26,11	4,93
502,242	512,836	543,892	538,849	571,857	20,0	20,1	25558,24	27,05	4,71
503,821	514,296	544,497	539,364	569,987	19,6	19,7	25432,35	27,65	4,66
503,356	513,193	540,723	535,541	561,094	20,0	20,0	25461,51	29,01	4,51
501,550	510,364	536,030	530,613	552,134	20,4	20,5	25580,46	29,77	4,38
501,629	510,095	534,693	529,207	548,691	20,7	20,8	25556,45	30,69	4,22
501,386	509,630	533,550	527,979	546,705	21,2	21,3	25584,01	31,30	4,23
500,706	507,915	529,411	523,473	538,118	20,5	20,7	25654,79	31,92	4,02
501,658	508,151	528,665	522,584	535,820	20,2	20,2	25543,31	32,95	4,03
501,901	508,113	527,482	521,305	533,367	20,4	20,4	25541,20	33,39	3,92
501,895	508,239	527,284	521,069	532,517	21,1	21,3	25544,41	33,98	3,90

499,836	504,873	522,135	515,457	524,698	19,7	19,9	25696,79	34,87	3,85
500,808	505,520	521,811	515,130	523,062	20,1	20,2	25621,82	35,98	3,72
502,314	506,317	521,784	514,944	521,995	20,5	20,6	25529,36	37,05	3,68
501,079	504,826	519,650	512,514	518,397	20,8	20,9	25630,12	37,78	3,66
500,803	503,791	517,695	510,569	515,629	21,2	21,3	25657,23	38,04	3,54
501,202	504,193	517,615	510,464	515,030	20,8	20,9	25570,22	38,76	3,54
501,595	503,907	516,674	509,361	512,945	20,0	20,1	25569,36	39,70	3,48

Tabela I.71 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
701,372	762,582	839,011	833,103	906,542	20,5	20,6	25464,80	0,00	7,80
701,678	762,363	837,453	831,312	904,355	21,1	21,1	25462,81	1,83	7,76
698,912	758,498	832,395	826,466	898,225	20,9	21,0	25726,60	3,02	7,70
699,577	758,815	832,435	826,533	898,308	20,3	20,4	25683,09	3,64	7,66
701,778	760,213	833,368	827,575	899,347	20,0	20,1	25566,42	4,51	7,61
698,407	752,177	824,362	818,430	889,971	21,1	21,1	25585,95	6,14	7,44
701,382	754,240	826,362	820,266	891,785	21,0	21,1	25537,50	6,53	7,42
700,331	749,764	820,977	814,897	885,738	20,6	20,8	25694,28	7,35	7,34
700,954	749,100	820,250	814,052	884,707	20,3	20,5	25649,03	7,91	7,30
699,165	745,291	816,142	809,829	880,492	20,4	20,4	25498,14	8,65	7,21
698,320	742,164	812,564	806,231	876,396	20,6	20,7	25538,79	9,35	7,15
699,013	741,537	811,625	805,173	875,211	20,8	20,9	25460,92	10,10	7,11
698,829	738,149	807,604	801,096	870,598	21,2	21,2	25453,63	11,16	6,99
699,984	737,802	806,483	799,892	868,553	21,2	21,3	25685,86	11,98	6,94
699,798	735,852	804,186	797,464	865,945	20,7	20,8	25663,28	12,77	6,91
699,055	733,158	800,982	794,236	862,618	20,3	20,4	25516,34	13,80	6,82
703,137	737,584	804,845	798,111	865,421	20,5	20,5	25439,62	15,07	6,79
699,328	730,983	796,383	789,619	854,989	20,8	20,8	25448,59	16,54	6,67
701,443	731,532	795,906	789,315	853,608	21,3	21,4	25560,79	17,65	6,63
701,711	730,140	793,435	786,909	849,995	21,2	21,3	25573,24	18,73	6,56
699,925	727,605	790,291	783,621	846,058	20,7	20,9	25403,49	19,38	6,50
697,815	724,155	786,215	779,548	841,292	20,2	20,3	25565,88	20,49	6,43
699,293	724,655	785,531	778,876	839,338	20,0	20,1	25506,35	21,14	6,37
698,561	722,936	782,741	776,129	835,444	20,3	20,3	25541,74	22,26	6,33
700,283	724,921	784,006	777,413	836,048	20,7	20,8	25394,85	22,65	6,21
698,552	721,534	779,507	772,966	830,551	21,1	21,2	25570,44	23,35	6,17
699,424	721,445	779,075	772,382	829,441	21,3	21,4	25488,90	23,86	6,11
701,074	722,358	778,928	772,288	828,359	20,1	20,2	25409,46	24,91	5,97
697,977	719,136	775,054	768,567	824,263	20,3	20,3	25631,98	25,21	6,03



Tabela I.72 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
101,307	157,143	215,404	211,135	270,386	20,6	20,6	34063,34	0,00	7,57
101,894	151,576	207,503	203,477	261,848	20,4	20,4	34032,20	1,19	7,48
102,477	139,429	195,746	191,044	249,501	20,4	20,6	33957,30	1,72	7,38
102,384	124,491	179,995	175,626	233,340	20,5	20,6	33964,22	2,05	7,03
101,834	114,381	169,284	164,815	221,591	20,9	21,0	33987,40	2,38	6,77
101,353	107,991	161,797	157,091	213,160	21,2	21,2	34009,31	2,67	6,55
101,247	103,554	156,704	152,048	207,446	20,6	20,8	33996,04	2,89	6,42
101,932	98,812	149,573	144,205	198,784	20,1	20,2	33994,72	3,35	6,26
101,831	96,547	142,685	136,756	190,581	20,4	20,4	34000,16	3,65	6,08
104,083	96,882	129,622	122,175	174,720	20,8	20,9	33932,76	4,06	5,89
101,988	92,781	112,927	103,575	153,365	21,2	21,3	34054,26	4,19	5,52
106,005	97,125	110,456	100,236	129,512	19,9	20,0	33817,16	4,49	4,94
104,405	94,841	102,906	91,477	95,100	20,3	20,3	33888,60	4,60	4,16

Tabela I.73 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
302,207	353,855	415,566	410,984	469,490	21,1	21,2	34039,34	0,00	8,14
301,673	351,351	411,977	407,157	464,905	20,3	20,4	34130,27	1,37	8,15
303,660	352,724	413,102	408,302	465,976	20,5	20,6	34025,16	1,75	8,01
302,547	349,322	409,138	404,063	462,228	20,9	20,9	34033,67	2,49	7,92
301,295	346,667	406,015	400,910	458,640	21,1	21,2	34131,36	2,80	7,90
301,921	345,600	404,909	399,618	457,142	20,6	20,7	34093,72	3,16	7,83
301,650	344,644	404,050	398,637	456,050	20,2	20,3	34117,62	3,23	7,82
303,329	344,538	403,866	398,397	455,777	20,4	20,5	34024,49	3,54	7,79
302,111	341,467	400,522	394,749	451,789	20,6	20,7	34096,79	3,76	7,75
301,557	339,399	395,048	389,806	446,459	20,8	20,9	34102,54	4,08	7,68
303,160	334,757	389,970	384,783	441,414	21,0	21,1	34031,53	4,43	7,53
302,750	330,181	385,322	379,982	436,129	21,2	21,3	34063,23	4,75	7,50
303,211	324,772	379,810	374,467	430,220	20,7	20,8	34032,47	5,13	7,30
302,915	321,405	376,382	370,854	426,336	20,1	20,2	34071,70	5,40	7,24
303,102	317,678	372,573	366,932	421,957	20,3	20,3	34053,18	5,74	7,15
302,732	314,069	368,505	362,758	417,364	20,5	20,6	34061,63	6,08	7,03
300,367	308,836	362,847	357,073	411,091	20,8	20,8	34159,01	6,27	6,97
302,395	309,959	363,510	357,750	411,581	21,0	21,0	34079,79	6,60	6,93
302,495	306,223	359,170	353,338	406,818	21,2	21,2	34069,01	6,99	6,80
301,985	303,712	355,937	350,060	403,118	20,9	21,1	34075,78	7,26	6,69
301,915	301,404	352,360	346,358	398,937	20,5	20,7	34086,49	7,68	6,63
302,381	300,076	349,699	343,686	395,968	20,2	20,3	34044,46	8,08	6,57
303,194	299,183	346,448	340,225	391,801	20,4	20,4	34028,06	8,65	6,49
302,721	297,642	342,430	336,042	387,220	20,6	20,7	34061,70	8,96	6,41
302,804	296,625	338,447	331,716	381,856	20,9	20,9	34031,47	9,42	6,31



302,251	294,781	332,071	324,806	374,173	21,1	21,1	34107,53	9,87	6,17
303,371	295,155	330,502	322,928	368,013	21,2	21,3	34036,39	10,25	6,04
304,317	295,259	323,292	314,831	358,678	20,6	20,7	33984,81	10,69	5,81
302,944	292,528	315,158	305,838	342,932	20,1	20,2	34044,99	11,21	5,45
304,107	293,490	314,722	305,142	340,033	20,4	20,5	34024,93	11,60	5,34
305,936	296,485	316,873	307,379	330,204	20,7	20,7	33915,10	12,01	5,10
306,056	296,097	313,969	304,091	319,596	20,9	21,0	33918,52	12,48	4,69
306,638	296,535	312,289	301,964	314,809	21,1	21,2	33897,13	13,01	4,54
305,034	294,577	311,444	301,326	312,693	21,2	21,3	33986,21	13,50	4,54

Tabela I.74 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
499,471	556,254	614,646	610,217	668,742	20,7	20,7	34039,76	0,00	7,69
500,035	554,250	611,043	606,490	664,430	21,2	21,3	34081,07	1,89	7,56
500,364	553,225	609,561	605,144	662,796	20,3	20,3	34090,32	2,49	7,49
501,227	553,119	609,156	604,768	662,104	20,5	20,6	34063,08	3,10	7,46
502,153	553,902	609,847	605,353	662,518	20,9	20,9	34039,25	3,50	7,48
500,890	550,941	606,333	601,965	659,164	21,0	21,1	33990,10	3,99	7,42
500,739	548,079	603,074	598,556	655,466	20,4	20,4	34045,08	4,83	7,43
502,581	548,177	603,472	598,674	655,680	20,9	20,9	34000,49	5,34	7,40
501,399	544,076	598,435	593,909	650,912	21,1	21,2	34017,73	5,92	7,37
504,190	546,587	601,054	596,660	653,796	20,4	20,5	33888,47	6,23	7,35
499,585	540,171	594,337	589,499	645,552	20,2	20,2	34175,94	6,81	7,36
499,707	532,231	586,348	581,653	636,964	20,5	20,5	34179,39	7,38	7,22
501,112	527,759	581,521	576,794	632,040	20,8	20,9	34099,64	8,01	7,10
502,123	527,370	581,080	576,419	631,573	21,1	21,1	34033,83	8,34	7,05
501,384	523,653	577,254	572,520	627,142	21,3	21,4	34033,70	8,78	7,08
501,012	516,430	569,652	564,769	618,711	20,4	20,4	34085,96	9,50	6,92
501,718	515,180	568,337	563,406	617,182	20,8	20,9	34050,10	9,89	6,80
501,290	510,854	563,938	558,759	611,988	20,3	20,3	34061,81	10,46	6,66
499,496	506,789	559,550	554,130	606,854	20,6	20,6	34119,75	10,91	6,64
501,237	507,210	559,865	554,196	606,886	20,8	20,9	34026,38	11,31	6,68
500,440	503,325	555,460	549,572	601,596	21,1	21,1	34053,53	11,92	6,50
500,437	501,439	552,751	546,641	598,261	20,7	20,8	34021,54	12,58	6,40
499,021	498,376	549,113	542,853	593,950	20,3	20,4	34153,51	12,80	6,36
500,552	498,815	548,804	542,544	593,408	20,6	20,7	34070,03	13,47	6,30
500,736	497,031	545,536	539,241	589,503	20,9	21,0	34066,79	14,17	6,21
501,573	497,566	544,447	537,948	588,076	21,2	21,3	34005,44	14,66	6,18
500,342	494,804	540,610	534,005	583,586	20,3	20,4	34080,94	14,96	6,38
501,417	495,839	539,869	532,970	582,084	20,1	20,1	34022,64	15,44	6,07
500,933	494,385	535,983	528,842	577,281	20,5	20,6	34058,43	16,13	6,00
502,982	496,061	536,917	529,797	576,267	21,0	21,1	33962,93	16,46	5,89
502,789	495,534	531,568	523,918	569,592	21,3	21,3	33950,53	17,01	5,77
502,682	493,990	524,877	516,433	558,561	20,4	20,6	33947,10	18,00	5,69
500,909	490,560	520,989	512,296	552,409	20,1	20,1	34121,37	18,30	5,89
502,258	492,702	518,146	508,939	536,787	20,4	20,5	34076,62	19,24	5,40
500,690	489,991	513,076	503,474	526,398	20,7	20,8	34166,43	19,94	5,09

500,448	490,762	511,697	501,854	519,343	20,9	21,0	34157,19	20,77	4,83
502,241	492,134	511,181	500,968	515,442	21,1	21,2	34041,78	21,44	4,68

Tabela I.75 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
697,453	749,223	810,822	806,002	864,078	23,0	23,1	33969,45	0,00	7,80
698,834	750,246	811,371	806,531	864,201	21,8	21,9	33894,77	1,85	7,70
699,179	750,027	810,609	805,632	862,756	20,6	20,7	34101,24	2,54	7,65
700,781	751,010	811,371	806,392	863,547	21,0	21,0	34004,25	3,22	7,64
697,823	746,966	806,648	801,533	857,963	21,3	21,4	34129,66	3,98	7,59
699,161	747,666	807,096	801,917	858,323	20,7	20,8	34056,62	4,83	7,56
700,188	747,979	807,264	802,143	858,544	20,3	20,4	33992,40	5,54	7,53
698,689	745,256	804,224	798,889	854,924	20,2	20,2	34071,10	6,16	7,51
699,447	745,507	804,369	799,018	855,216	20,5	20,5	34054,04	6,46	7,49
700,054	745,558	804,381	799,101	855,315	20,8	20,9	33992,99	6,84	7,46
700,258	745,137	803,851	798,741	855,130	21,2	21,2	33977,44	7,12	7,44
700,128	743,509	801,715	796,353	852,215	21,4	21,5	33970,47	7,94	7,40
699,922	742,472	797,331	792,200	847,925	20,1	20,1	33984,76	8,77	7,33
697,926	736,986	791,213	785,879	841,414	20,5	20,5	34046,43	9,51	7,29
700,387	736,695	790,469	785,482	840,471	20,8	20,8	33942,34	10,45	7,20
699,528	733,203	787,322	782,032	836,646	21,1	21,2	33974,25	11,13	7,18
699,082	724,791	779,074	773,205	826,755	21,3	21,4	33963,55	12,36	7,00
699,684	722,113	776,398	770,666	823,828	20,7	20,8	33904,32	12,99	6,94
699,794	717,395	771,050	765,169	818,068	20,3	20,4	33936,28	13,91	6,83
697,878	710,498	763,361	757,372	809,418	20,3	20,4	34013,30	15,15	6,69
698,834	708,329	760,365	754,360	805,951	20,8	20,9	33971,60	16,10	6,58
698,721	705,699	757,551	751,551	802,651	21,1	21,2	33983,71	16,68	6,52
699,104	705,190	756,507	750,465	801,560	21,3	21,4	33968,60	17,12	6,48
696,893	701,341	752,122	746,009	796,499	20,0	20,1	34089,14	17,35	6,46
698,678	701,646	751,921	745,806	796,087	20,2	20,3	33993,93	18,19	6,40
701,388	702,349	751,031	744,770	794,591	20,6	20,7	33853,82	19,41	6,25
698,295	696,036	742,920	736,326	784,986	21,0	21,0	33991,22	20,75	6,13
698,979	695,859	740,338	733,738	781,422	21,2	21,3	33968,17	21,58	6,04
700,350	696,668	740,099	733,267	780,025	21,3	21,4	33875,43	22,41	5,95
698,753	693,189	734,782	727,707	773,124	20,9	21,0	33996,89	23,14	5,85
698,096	691,455	729,952	722,320	765,683	20,6	20,7	34037,55	24,07	5,70
699,100	693,121	728,115	720,125	758,812	20,9	21,0	33991,46	24,72	5,74
699,609	693,012	726,221	718,152	754,803	20,2	20,3	33950,55	25,45	5,60
700,351	693,357	724,270	715,885	748,887	20,4	20,5	33937,29	26,16	5,45

Tabela I.76 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,583	136,072	177,546	168,242	203,385	24,7	24,8	42552,67	0,00	7,49
101,769	119,993	156,093	146,245	177,202	21,5	21,6	42560,16	1,73	7,14
101,081	97,014	130,556	120,261	149,256	21,3	21,4	42512,42	2,04	6,70
102,253	81,058	111,296	100,623	126,598	21,7	21,8	42455,22	2,32	6,25
101,695	78,009	107,167	96,257	121,147	21,2	21,3	42474,93	2,42	6,15
102,281	71,950	96,492	84,669	104,923	20,5	20,6	42474,42	2,77	5,82
103,345	70,683	91,880	79,506	96,773	20,2	20,3	42423,86	2,99	5,61
107,035	71,972	87,764	74,169	83,974	20,2	20,2	42305,90	3,27	5,29
111,607	76,454	91,472	77,597	76,604	20,5	20,5	42102,03	3,46	5,10

Tabela I.77 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
300,015	333,190	374,845	365,801	401,062	21,3	21,4	42437,20	0,00	7,70
300,636	331,999	372,610	363,427	397,487	20,4	20,5	42556,91	1,07	7,67
300,568	330,733	370,716	361,411	394,947	20,2	20,2	42529,50	1,64	7,54
300,915	330,428	370,016	360,709	393,874	20,0	20,0	42525,95	1,94	7,55
299,897	327,854	366,770	357,272	389,683	20,7	20,8	42555,01	2,37	7,42
301,553	329,844	368,573	358,963	391,094	21,5	21,5	42470,67	2,73	7,51
300,872	326,192	364,106	354,335	385,535	21,4	21,5	42514,58	3,25	7,42
300,969	325,568	362,471	352,642	383,231	20,7	20,8	42564,79	3,61	7,45
300,300	322,850	359,141	349,190	379,409	20,2	20,3	42562,87	3,88	7,32
301,205	321,285	357,657	347,376	377,225	20,5	20,6	42515,57	4,21	7,37
301,333	319,151	355,266	344,743	374,084	20,4	20,4	42520,53	4,54	7,35
302,549	316,590	352,298	341,675	370,747	20,2	20,3	42476,71	4,80	7,22
300,346	306,495	341,388	330,290	357,891	20,5	20,6	42566,69	5,25	7,03
302,368	301,851	336,662	325,342	352,426	21,0	21,0	42474,22	5,66	6,86
302,709	293,023	327,382	315,608	341,842	21,3	21,4	42449,40	6,04	6,64
301,238	286,651	320,460	308,585	334,398	20,8	20,9	42489,69	6,23	6,68
301,636	279,765	312,483	300,352	325,074	20,4	20,5	42483,07	6,72	6,34
302,320	275,961	307,563	295,154	318,748	20,2	20,3	42458,87	7,25	6,24
301,367	271,075	301,267	288,731	310,777	19,8	19,9	42498,98	7,69	6,09
300,972	267,666	296,275	283,435	303,690	20,2	20,3	42514,74	8,15	5,94
302,068	267,155	294,636	281,728	301,315	20,6	20,7	42429,59	8,54	5,86
302,234	266,566	293,441	280,350	299,284	21,0	21,0	42437,51	8,75	5,84
301,517	264,535	290,201	276,870	294,812	21,1	21,2	42466,45	8,90	5,79
302,267	262,654	285,641	271,831	287,559	21,6	21,7	42408,63	9,57	5,58
301,499	260,247	280,561	266,234	279,387	21,2	21,3	42462,54	9,96	5,43
303,199	260,784	278,324	263,633	275,497	21,0	21,1	42394,54	10,30	5,29
303,374	260,351	275,673	260,369	270,822	20,8	20,9	42389,11	10,52	5,19
306,662	262,747	272,330	255,957	259,944	20,4	20,5	42286,53	10,91	4,89
306,843	262,801	265,080	247,367	235,479	20,1	20,2	42251,64	11,20	4,34

Tabela I.78 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
499,640	532,709	573,920	564,697	598,914	21,4	21,5	42533,76	0,00	7,87
501,576	533,318	574,008	564,575	598,121	21,3	21,3	42468,52	1,66	7,80
498,901	529,598	569,556	560,150	592,930	21,0	21,1	42577,16	2,06	7,74
500,482	530,823	570,417	561,012	593,729	20,8	20,9	42505,26	2,59	7,79
500,341	530,053	569,435	560,013	592,460	20,7	20,8	42494,75	3,00	7,77
500,504	529,055	567,990	558,401	590,386	20,3	20,3	42511,64	3,44	8,01
501,004	529,525	568,142	558,653	590,404	20,8	20,9	42483,38	3,75	7,90
498,842	528,249	566,321	556,667	587,757	21,2	21,2	42539,32	4,15	7,78
499,058	524,856	562,760	552,815	583,309	21,6	21,7	42536,90	4,88	7,58
499,629	526,550	563,709	553,921	584,383	21,9	22,0	42523,99	5,08	7,58
500,279	525,352	562,931	553,052	583,188	21,8	21,9	42490,93	5,42	7,53
501,076	524,708	561,632	551,690	581,292	21,3	21,4	42452,78	6,04	7,51
499,814	522,205	558,020	548,055	577,238	21,1	21,2	42518,42	6,50	7,47
499,737	519,935	555,769	545,531	573,990	20,9	21,0	42532,40	7,07	7,44
499,843	519,331	554,344	544,164	572,393	20,7	20,8	42497,58	7,42	7,43
499,729	516,014	550,685	540,278	567,651	20,5	20,6	42534,14	8,05	7,35
500,315	515,010	549,248	538,798	565,940	20,4	20,5	42498,09	8,38	7,33
499,847	513,519	547,640	537,180	564,347	20,9	20,9	42504,47	8,43	7,31
501,383	510,916	544,906	534,225	560,945	21,3	21,4	42439,17	8,96	7,23
500,537	506,643	540,536	529,657	555,873	21,8	21,8	42469,10	9,27	7,13
500,351	500,669	533,912	522,842	548,304	21,5	21,6	42481,88	9,74	7,01
501,666	499,000	532,505	521,202	546,637	20,9	21,0	42411,34	10,16	7,08
500,289	490,703	523,848	512,018	536,582	20,6	20,7	42454,69	10,69	7,01
501,223	485,885	518,757	506,501	530,515	20,3	20,4	42430,52	11,31	6,65
500,395	479,801	511,939	499,437	522,492	20,1	20,2	42482,18	11,83	6,51
500,411	475,481	506,658	493,990	516,128	20,4	20,5	42480,58	12,50	6,39
499,310	473,242	503,819	490,980	512,363	20,8	20,8	42545,13	12,79	6,35
500,403	470,504	500,324	487,423	508,022	21,1	21,2	42485,79	13,42	6,50
499,024	467,541	496,562	483,436	503,118	21,6	21,6	42505,97	13,78	6,31
499,391	466,098	494,385	481,142	499,986	21,4	21,6	42517,48	14,29	6,03
500,836	467,099	495,142	481,904	500,598	21,3	21,4	42461,28	14,58	6,00
500,132	467,263	495,371	482,183	501,011	21,8	21,9	42452,68	14,47	6,18
499,982	464,540	491,419	477,977	495,629	21,3	21,4	42472,80	15,15	6,07
500,082	461,589	486,574	472,850	488,669	21,0	21,1	42496,25	16,03	5,89
500,281	459,638	482,830	468,612	482,815	20,9	21,0	42475,03	16,89	5,73
501,493	459,615	481,397	467,080	480,120	20,7	20,8	42462,55	17,36	5,48
502,374	458,124	476,817	461,911	472,054	20,3	20,4	42479,82	18,13	5,51
501,182	456,213	473,753	458,571	468,299	20,7	20,8	42460,36	18,64	5,45

Tabela I.79 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
701,852	735,162	776,195	766,817	800,665	21,5	21,5	42441,39	0,00	7,74
700,252	731,869	772,071	762,534	795,436	21,2	21,3	42485,41	2,00	7,63
701,307	732,208	771,957	762,384	795,006	20,5	20,6	42451,52	2,96	7,58
699,544	729,417	768,406	758,743	790,611	21,1	21,1	42510,52	3,81	7,54
701,045	730,060	768,652	759,000	790,308	21,2	21,3	42464,11	4,73	7,51
700,751	729,110	767,282	757,613	788,558	20,3	20,4	42465,12	5,41	7,47
699,631	726,630	764,287	754,382	784,650	20,5	20,5	42523,86	6,21	7,41
696,681	722,885	759,437	749,260	778,777	20,8	20,8	42618,77	6,84	7,38
699,592	724,694	761,876	751,632	781,135	21,5	21,6	42503,38	7,33	7,37
698,815	723,328	759,392	749,160	777,910	21,2	21,4	42520,92	8,13	7,34
699,099	721,090	756,762	746,288	774,416	20,7	20,8	42532,94	9,10	7,28
700,598	722,650	758,282	747,832	775,647	20,3	20,4	42499,15	9,61	7,28
698,621	717,844	752,638	741,860	769,120	20,4	20,5	42573,76	10,34	7,19
701,680	720,356	755,353	744,590	771,830	20,9	20,9	42419,60	11,13	7,16
699,618	713,657	747,293	736,061	761,666	21,3	21,3	42501,50	12,57	7,05
699,372	708,436	741,034	729,362	753,640	20,7	20,8	42697,24	13,37	6,95
700,357	700,269	733,057	721,034	745,113	20,2	20,2	42480,89	14,80	6,74
700,521	694,950	727,399	715,080	738,449	20,8	20,9	42449,79	15,60	6,60
699,980	686,474	718,306	705,623	728,093	21,3	21,3	42451,09	16,62	6,41
698,567	681,240	712,160	699,318	720,878	21,5	21,6	42490,57	17,39	6,29
699,244	676,696	707,096	694,072	714,754	21,2	21,3	42484,07	18,24	6,12
698,517	672,778	702,274	689,114	708,665	20,9	21,0	42500,48	19,14	6,00
698,780	669,518	698,141	684,784	703,411	20,5	20,6	42520,10	20,01	5,86
699,315	667,089	694,800	681,327	698,837	20,3	20,4	42509,32	20,98	5,76
698,483	663,555	690,060	676,341	692,506	20,9	20,9	42504,31	22,00	5,64
699,156	662,152	687,181	673,317	688,173	21,4	21,5	42466,54	23,13	5,51
700,046	662,281	686,586	672,524	686,844	21,6	21,7	42455,86	23,61	5,42
700,488	658,864	680,877	666,384	678,610	20,3	20,4	42462,15	25,22	5,29

Tabela I.80 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 30000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,493	182,940	285,570	278,456	378,821	20,9	21,0	30076,33	0,00	10,78
100,172	178,599	278,577	271,450	370,404	20,2	20,4	30023,32	1,23	10,60
100,977	178,336	277,973	270,826	369,694	20,3	20,4	29966,74	1,40	10,46
100,193	176,125	275,367	268,138	366,864	20,6	20,7	30006,95	1,54	10,35
100,218	174,085	272,765	265,616	363,946	21,0	21,1	30012,99	1,72	10,45
99,928	171,870	270,233	263,083	361,388	20,0	20,1	30043,77	1,85	10,63
99,999	170,602	268,805	261,624	359,883	20,1	20,2	30029,56	1,95	10,40
100,488	166,881	264,451	257,296	355,661	20,6	20,7	29979,00	2,15	10,28
99,469	162,523	259,656	252,419	350,759	21,1	21,2	30035,27	2,28	10,18
100,458	161,488	258,571	251,254	349,636	20,2	20,3	30011,71	2,44	10,15

100,888	155,706	252,391	245,062	343,344	20,5	20,6	29984,59	2,56	9,97
100,737	152,264	248,410	241,055	339,060	20,9	20,9	29974,41	2,75	9,81
100,516	148,646	243,854	236,659	333,833	21,0	21,1	30129,80	2,92	9,76
99,901	143,826	238,139	230,953	327,629	20,3	20,4	30183,68	3,21	9,70
100,681	141,918	235,372	228,251	324,696	20,6	20,7	30004,58	3,42	9,61
100,578	140,340	233,495	226,420	322,727	20,8	20,9	30010,38	3,61	9,50
102,298	138,353	227,791	221,099	316,461	21,2	21,3	29919,81	3,84	9,30
100,347	133,586	223,328	216,705	311,779	20,4	20,5	30005,01	4,06	9,20
100,254	131,128	217,938	211,503	305,587	20,1	20,2	30048,37	4,31	9,03
101,478	131,579	215,506	209,150	302,382	20,4	20,5	29987,29	4,50	8,93
99,927	125,827	208,570	202,306	294,568	20,2	20,3	30035,91	4,79	8,88
100,736	127,014	211,402	204,747	297,099	21,1	21,2	29976,72	4,91	8,91
101,837	124,638	205,848	199,374	290,472	20,0	20,1	29891,30	5,30	8,70
100,219	120,492	197,525	191,145	279,784	20,0	20,0	29998,72	5,53	8,46
101,656	120,891	197,447	191,086	279,862	20,4	20,4	29931,47	5,72	8,38
101,108	118,690	191,823	185,720	273,503	21,0	21,0	29942,33	5,97	8,27
101,095	116,777	184,160	178,313	262,816	20,0	20,2	29956,48	6,16	8,01

Tabela I.81 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 30000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
299,897	383,564	486,404	478,963	579,392	20,7	20,9	30081,73	0,00	10,77
300,164	381,649	481,555	474,224	572,825	20,1	20,2	30079,94	2,22	10,60
301,226	381,912	481,612	474,207	572,664	20,1	20,1	30010,35	2,53	10,54
300,502	380,042	479,123	471,732	569,796	20,7	20,8	30037,00	2,89	10,43
300,689	376,993	475,301	467,807	565,452	21,2	21,2	30038,05	3,49	10,34
299,807	373,163	470,697	463,266	560,680	21,1	21,2	30092,89	3,93	10,24
298,568	367,606	464,303	456,815	553,987	20,4	20,5	30157,34	4,46	10,12
299,658	363,868	459,934	452,466	549,545	20,0	20,1	30110,40	4,99	10,08
301,057	360,622	456,115	448,598	545,583	20,1	20,2	30018,36	5,46	9,85
300,895	354,809	449,374	441,801	538,090	20,5	20,6	30016,81	6,15	9,85
301,230	351,487	445,595	437,617	533,436	20,2	20,4	30053,73	6,63	9,61
301,814	350,496	444,114	436,235	531,883	21,1	21,2	30022,92	6,89	9,62
300,983	345,115	437,801	429,999	524,881	20,4	20,6	30078,74	7,42	9,53
300,952	344,594	436,607	428,895	523,357	20,3	20,3	30105,36	7,81	9,51
301,304	342,710	433,855	426,240	520,338	20,9	21,0	30043,78	8,18	9,37
301,502	340,220	430,326	422,712	516,330	21,2	21,3	30016,43	8,56	9,32
302,898	339,577	429,486	421,835	515,396	20,6	20,7	29954,78	9,02	9,27
302,031	336,782	425,721	418,104	511,086	20,1	20,3	30024,56	9,45	9,22
300,369	333,059	420,822	413,301	505,262	20,2	20,3	30105,26	9,88	9,05
300,244	331,492	418,536	411,065	502,634	20,9	21,0	30086,43	10,24	9,08
301,536	332,202	418,822	411,334	502,766	21,2	21,4	30046,68	10,38	8,94
300,747	330,217	416,010	408,522	499,113	20,5	20,6	30074,73	10,77	8,97
300,444	330,348	416,923	409,332	499,816	20,3	20,3	30087,69	11,04	9,03
300,607	330,095	414,195	406,779	495,878	20,6	20,7	30035,96	11,18	8,87
299,780	327,799	412,497	404,948	494,320	21,2	21,2	30114,49	11,46	8,90
300,173	326,560	410,938	403,344	492,476	20,7	20,8	29962,77	11,70	8,94
301,328	326,082	407,722	400,226	487,778	20,6	20,7	29968,41	12,27	8,78

300,433	324,372	405,213	397,738	484,428	21,1	21,1	29992,26	12,54	8,77
300,040	323,428	404,813	397,373	484,039	21,2	21,3	30107,59	12,73	8,79
302,504	324,003	401,312	393,998	478,431	20,3	20,3	29989,48	13,56	8,58
300,608	320,163	393,309	386,295	467,887	20,7	20,8	30075,56	14,11	8,39
302,075	320,322	391,129	384,026	464,122	21,1	21,2	30004,42	14,69	8,28
300,292	316,636	382,837	375,915	452,923	20,9	21,0	30099,78	15,37	8,14
300,371	314,295	373,424	366,621	437,891	20,1	20,3	30126,06	16,22	7,74
301,254	315,027	371,404	364,694	435,262	20,4	20,5	30055,53	16,75	7,68
300,591	313,572	368,469	361,871	431,382	20,9	21,0	30107,60	16,83	7,57
302,666	315,160	367,210	360,582	427,082	21,3	21,4	29976,45	17,39	7,56
302,065	313,664	360,318	353,426	416,037	20,4	20,6	29990,98	18,29	7,21
300,268	311,669	353,698	346,540	404,693	20,0	20,1	30133,16	18,75	7,00
301,056	312,990	345,955	340,314	378,302	20,7	20,8	30062,09	19,39	6,18
300,542	310,832	338,677	332,438	357,378	21,2	21,3	30091,64	20,25	5,61
301,061	310,458	335,649	329,056	349,256	20,1	20,2	30060,44	21,07	5,29
301,406	309,508	331,102	323,961	338,821	20,5	20,5	30042,33	22,09	5,02
299,653	305,435	323,333	315,444	325,957	21,1	21,2	30138,77	23,25	4,73
300,063	303,879	318,984	310,634	317,697	21,1	21,3	30106,33	24,80	4,51

Tabela I.82 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 30000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,530	584,184	687,392	679,895	780,066	20,9	21,0	29916,88	0,00	10,62
499,533	582,059	683,497	676,099	775,107	20,7	20,9	29981,96	1,82	10,60
500,689	583,002	684,148	676,625	775,512	20,1	20,3	30026,57	2,09	10,61
500,450	582,518	683,068	675,742	774,222	20,4	20,4	30018,11	2,65	10,48
500,458	582,232	682,116	674,810	772,798	20,8	20,9	30043,42	3,19	10,48
500,710	581,980	681,220	673,918	771,638	21,2	21,3	29995,90	3,92	10,38
500,562	580,623	679,345	672,048	769,406	20,9	21,0	30012,19	4,56	10,32
501,102	579,865	678,118	670,718	767,863	20,1	20,3	30012,66	5,10	10,30
501,024	578,818	676,718	669,357	766,429	20,2	20,3	30043,81	5,42	10,29
501,030	575,961	673,245	665,882	762,818	20,6	20,7	30002,55	6,00	10,20
500,236	571,799	668,358	660,935	757,744	21,1	21,2	30060,16	6,68	10,12
500,882	569,948	666,267	658,682	755,451	21,0	21,2	30002,07	7,08	10,04
500,354	566,666	662,522	654,925	751,056	20,3	20,4	30057,38	7,77	10,00
500,065	563,733	659,070	651,282	747,167	20,3	20,4	30056,60	8,25	9,91
501,186	562,189	657,550	649,551	745,248	20,8	20,9	30009,13	8,67	9,83
501,761	559,519	654,298	646,193	741,521	21,2	21,3	29992,47	9,28	9,78
499,937	555,132	648,936	640,940	735,591	20,9	21,0	30146,84	9,93	9,80
501,816	553,031	646,332	638,270	732,647	20,0	20,2	30043,33	10,63	9,61
500,848	550,003	642,509	634,580	728,284	20,3	20,4	30109,56	11,45	9,52
499,719	547,026	638,714	630,809	724,283	21,0	21,1	30006,86	12,06	9,46
499,555	544,576	635,612	627,784	720,685	21,2	21,3	29996,10	12,72	9,33
500,225	544,148	634,449	626,591	718,832	20,7	20,9	30003,80	13,38	9,42
499,869	543,272	633,778	625,840	717,845	20,4	20,5	30002,17	14,16	9,39
500,041	541,156	630,618	622,667	713,666	20,9	21,0	29967,39	14,81	9,25
499,556	540,122	629,211	621,323	711,968	21,3	21,4	29986,25	15,21	9,22
499,669	538,246	626,807	618,991	709,488	20,8	21,0	30013,02	15,77	9,16



499,197	536,213	623,895	616,066	705,692	20,4	20,6	30030,04	16,46	9,09
498,822	533,782	620,389	612,640	701,315	20,3	20,3	30076,14	16,94	9,04
498,908	532,778	618,531	610,813	698,688	20,5	20,6	30069,36	17,48	8,93
499,344	531,804	616,344	608,660	695,537	20,8	20,9	30024,84	18,28	8,87
500,599	530,959	615,176	607,397	693,881	21,1	21,2	29942,10	18,99	8,79
501,178	531,015	614,732	607,013	692,869	20,8	21,0	30126,91	19,24	8,77
502,069	528,980	609,877	602,156	685,561	20,5	20,6	30048,18	20,84	8,58
503,855	529,515	608,983	601,122	683,353	20,9	20,9	29922,01	21,71	8,49
501,989	527,168	605,260	597,665	678,742	21,2	21,2	30058,57	21,98	8,44
501,610	525,921	603,219	595,556	676,129	21,0	21,2	30069,28	22,42	8,40
500,529	523,594	599,248	591,710	670,722	20,2	20,3	30147,17	23,05	8,34
500,529	523,231	598,014	590,550	668,880	19,9	19,9	30125,60	23,42	8,28
501,489	523,238	596,777	589,332	666,700	20,2	20,3	30054,11	24,12	8,20
500,054	520,763	591,100	583,704	658,918	20,5	20,5	30145,35	24,67	8,11
499,864	519,847	589,959	582,586	657,730	21,1	21,2	30121,75	25,17	8,02
500,725	520,162	588,868	581,395	655,662	20,8	21,0	30102,86	25,56	8,16
501,532	520,824	588,378	580,983	654,085	20,2	20,3	30104,33	25,91	8,04
502,080	520,633	587,040	579,776	652,387	20,4	20,4	30027,70	26,45	7,99
500,504	518,175	581,724	574,506	645,033	20,7	20,8	29933,29	27,12	7,85
502,179	518,781	579,820	572,484	641,164	21,2	21,3	29835,85	27,87	7,67
499,814	514,705	571,751	564,487	629,332	20,0	20,1	29998,67	28,71	7,42
501,399	515,814	569,327	562,038	624,677	20,6	20,7	29906,47	30,08	7,42
501,316	515,345	566,447	559,149	620,979	21,1	21,1	30068,05	30,74	7,33
500,613	514,045	562,329	554,809	613,112	20,9	21,1	30078,43	31,43	7,07
500,989	514,073	556,935	549,145	599,523	20,2	20,3	30096,57	32,91	6,70
502,723	516,045	550,637	544,642	580,939	20,4	20,4	29975,23	33,14	6,10
502,974	515,455	547,432	541,295	571,265	20,8	20,8	29964,26	34,00	5,83
502,353	513,801	542,980	536,366	560,178	21,2	21,3	30002,64	35,20	5,64
501,611	511,616	537,835	530,703	549,360	20,3	20,4	30053,53	36,53	5,49
502,132	511,497	535,369	527,943	543,019	20,7	20,8	30004,23	37,71	5,33
501,145	509,836	532,299	524,662	538,342	21,0	21,1	30052,53	38,08	5,22
501,745	509,571	529,946	522,002	533,005	21,4	21,5	30017,33	39,23	5,03
500,248	507,204	526,521	518,302	527,973	20,4	20,6	30122,17	39,50	4,99

Tabela I.83 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 40000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,824	180,197	258,366	253,410	333,426	20,0	20,2	40018,92	0,00	10,62
101,131	173,510	248,690	243,665	322,499	20,3	20,3	39991,87	1,45	10,39
100,784	167,537	242,623	237,454	315,563	20,6	20,7	39986,84	1,85	10,41
99,531	156,773	231,460	226,287	303,332	20,9	21,0	40047,68	2,14	10,33
100,893	136,258	210,419	205,232	281,832	20,9	21,1	39975,41	2,46	9,93
100,405	127,485	201,556	196,262	272,466	20,0	20,1	39998,27	2,62	9,74
100,539	120,373	193,408	188,132	264,006	20,2	20,3	39998,49	2,85	9,49
101,203	118,063	190,834	185,635	261,479	20,5	20,6	39974,20	2,96	9,39
100,951	113,637	185,704	180,430	255,994	20,8	20,9	39997,83	3,13	9,31
100,935	109,778	181,012	175,523	250,981	21,1	21,1	39983,10	3,32	9,17
100,810	106,074	176,679	170,983	246,072	21,0	21,2	39995,68	3,43	9,16



99,952	102,235	172,365	166,619	241,448	20,1	20,3	40016,12	3,52	9,19
99,168	99,842	169,016	163,114	237,407	19,9	19,9	40038,10	3,63	9,15
100,643	99,386	168,312	162,064	236,207	20,6	20,6	39972,98	3,77	9,24
100,721	98,530	166,840	160,407	234,154	21,0	21,1	39970,64	3,89	8,72
100,136	96,994	165,127	158,469	232,101	21,3	21,4	39975,71	3,94	8,68
100,434	95,099	160,418	153,331	226,396	20,1	20,3	39972,91	4,18	8,59
100,471	93,947	158,233	151,030	223,779	20,1	20,2	39977,84	4,33	8,54
100,288	93,327	154,595	147,101	219,601	20,4	20,5	39995,13	4,39	8,48
101,405	93,748	151,449	143,698	215,812	20,8	20,9	39963,13	4,54	8,38
100,819	92,427	141,324	132,805	204,496	21,1	21,2	39976,43	4,63	8,20
99,065	89,156	102,044	87,662	131,301	19,8	20,0	40004,04	4,81	6,89
102,412	93,058	107,482	93,591	119,913	20,3	20,4	39953,88	4,92	6,71
102,962	93,528	105,154	90,521	97,817	20,8	20,9	39909,90	5,01	6,11

Tabela I.84 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 =$

$$400 \text{ kPa}, \dot{m}_{L,1,0,BEP} = 40000 \text{ kg/h}, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
299,734	369,861	453,095	446,781	526,920	21,2	21,3	40055,73	0,00	10,90
300,598	368,613	450,959	444,413	523,914	20,3	20,3	40060,85	1,32	11,00
299,003	366,796	448,965	442,436	522,013	21,3	21,4	39931,18	1,63	11,09
300,464	367,954	449,965	443,387	522,916	21,2	21,4	39911,96	1,88	10,87
300,723	367,401	448,982	442,238	521,290	20,7	20,8	40043,20	2,12	10,83
300,677	367,093	448,422	441,573	520,492	20,4	20,4	40052,15	2,35	10,80
301,808	367,806	449,025	442,129	520,988	21,0	21,1	40007,31	2,55	10,80
301,288	366,712	447,542	440,628	519,214	21,1	21,2	40013,82	2,82	10,86
300,782	365,539	446,234	439,198	517,661	20,4	20,6	40064,71	3,02	10,81
300,847	365,079	445,673	438,567	516,930	20,0	20,1	40076,26	3,24	10,69
299,842	362,725	442,997	435,718	513,574	19,9	20,0	40112,64	3,58	10,76
300,121	361,219	441,177	433,657	511,233	20,7	20,7	40109,85	4,02	10,71
301,147	360,343	440,011	432,422	509,739	21,1	21,2	40057,92	4,42	10,52
300,685	356,121	435,356	427,535	504,430	21,5	21,6	40061,45	4,88	10,44
301,495	352,733	427,080	419,946	496,338	21,0	21,1	40043,89	5,41	10,40
300,799	349,255	423,771	416,652	492,988	20,1	20,3	40016,34	5,52	10,23
300,859	342,542	416,545	409,657	485,497	21,0	21,0	40039,57	5,80	10,13
300,018	337,453	411,364	404,396	479,813	21,4	21,5	40048,67	6,00	10,06
299,403	333,374	407,028	400,156	475,405	21,1	21,2	40060,57	6,15	10,06
300,159	332,794	406,643	399,776	475,124	20,3	20,4	40054,80	6,14	10,02
301,959	328,989	402,906	395,994	470,875	20,0	20,1	40022,02	6,51	9,95
301,049	323,157	396,754	389,714	464,340	20,7	20,8	40057,71	6,73	9,77
299,925	319,301	392,220	384,996	458,835	21,2	21,3	40090,38	6,97	9,76
300,096	316,800	389,692	382,713	456,480	20,6	20,7	40089,85	7,11	9,63
300,265	311,078	383,345	376,364	449,432	20,5	20,6	40077,20	7,65	9,50
300,398	309,678	381,382	374,404	447,332	21,2	21,3	40074,08	7,78	9,43
297,317	305,654	377,082	370,012	442,695	21,2	21,4	40137,50	7,76	9,29
300,536	306,493	377,750	370,746	443,356	20,2	20,3	40047,31	8,12	9,31
300,699	305,495	376,429	369,361	441,684	21,4	21,4	40043,90	8,25	9,20
301,937	303,378	373,543	366,488	438,361	20,1	20,2	40047,21	8,72	9,19
300,349	297,537	366,660	359,415	430,378	21,1	21,2	40089,26	9,12	9,03

300,162	297,004	365,883	358,639	429,469	21,2	21,3	40065,89	9,24	9,01
299,836	294,902	362,783	355,471	425,947	20,2	20,3	40072,41	9,60	8,89
300,098	294,451	360,967	353,517	423,657	20,5	20,6	40049,40	9,86	8,85
300,142	292,822	358,208	350,593	420,281	21,0	21,1	40055,03	10,18	9,08
300,570	292,399	356,894	349,255	418,623	21,5	21,6	39997,80	10,46	8,69
300,228	290,492	352,698	344,957	413,660	20,8	21,0	40032,91	10,84	8,76
300,534	289,622	348,805	340,742	409,215	20,1	20,2	40033,01	11,12	8,55
300,970	289,957	348,373	340,307	408,659	20,5	20,6	39999,79	11,31	8,56
302,463	290,751	345,296	336,730	404,758	21,0	21,0	39953,82	11,58	8,44
302,429	290,224	341,155	332,298	399,751	21,4	21,5	39926,73	11,89	8,39
300,475	287,003	328,755	318,713	385,229	20,9	21,1	40015,88	12,29	8,13
300,438	285,846	321,437	310,435	374,338	20,3	20,4	40004,39	12,75	7,92
301,061	286,243	310,519	297,544	355,739	20,9	20,9	39967,04	13,11	7,41
303,236	288,201	303,193	288,667	321,630	20,9	21,0	39875,78	13,58	6,70

Tabela I.85 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 40000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,200	570,905	653,465	648,327	726,501	20,2	20,3	40080,13	0,00	10,89
500,336	569,835	651,894	646,207	723,981	20,9	21,0	40006,74	1,57	10,78
500,397	569,199	650,952	645,227	722,670	20,3	20,3	40063,60	1,97	10,80
499,321	567,306	648,509	642,652	719,528	20,6	20,7	40091,12	2,69	10,73
499,956	567,669	648,678	642,657	719,567	20,9	21,0	40030,53	3,11	10,76
499,428	566,465	647,212	641,124	717,715	21,1	21,2	40060,33	3,54	10,66
500,949	567,500	648,217	642,007	718,637	20,3	20,5	40002,05	3,95	10,56
502,345	567,952	648,041	641,982	718,394	20,2	20,3	39978,26	4,71	10,54
500,558	565,164	644,880	638,701	714,451	20,7	20,7	40055,81	5,16	10,53
500,586	563,934	643,137	636,799	712,280	21,0	21,1	40067,22	5,81	10,51
499,455	561,051	639,792	633,416	708,733	21,3	21,4	40075,58	6,48	10,47
499,916	562,125	635,823	629,892	705,518	20,3	20,3	40064,90	7,38	10,38
501,299	559,730	633,123	627,227	702,375	20,7	20,8	40005,97	8,21	10,30
500,174	554,260	627,403	621,198	695,972	20,9	21,0	40040,63	8,70	10,17
499,311	549,008	621,935	615,652	689,861	20,2	20,3	40080,08	9,32	10,09
500,277	545,109	617,842	611,507	685,592	20,7	20,8	40073,83	9,65	10,08
502,102	542,130	615,157	608,609	682,570	21,1	21,1	40001,49	9,99	9,98
501,258	536,790	609,753	603,118	676,384	21,3	21,5	40036,65	10,45	9,84
500,099	528,524	601,130	594,380	667,474	20,5	20,7	40075,89	10,85	9,75
500,526	525,865	598,443	591,549	664,331	20,2	20,3	40086,08	11,21	9,69
499,956	518,088	590,076	582,970	654,893	20,5	20,5	40133,50	12,01	9,46
500,932	515,849	587,998	580,747	652,396	20,9	20,9	40051,93	12,35	9,37
500,079	511,617	583,322	576,047	647,119	21,2	21,3	40107,52	12,83	9,27
500,131	508,952	580,119	572,781	643,545	21,5	21,6	40088,85	13,28	9,20
500,808	506,589	577,210	569,831	640,180	20,8	21,0	40045,25	13,89	9,10
500,453	503,957	574,207	566,788	636,691	20,2	20,3	40062,99	14,34	9,00
500,028	501,531	571,087	563,656	633,319	21,5	21,5	40046,97	14,66	8,91
500,942	501,725	571,118	563,576	633,240	21,1	21,2	40000,89	14,93	8,91
499,775	498,148	567,045	559,386	628,496	20,6	20,7	40053,22	15,29	8,88
500,849	496,539	564,632	556,941	625,553	20,1	20,2	40004,61	16,02	8,76

499,445	494,049	560,776	553,119	621,050	20,5	20,6	40078,92	16,47	8,73
500,557	494,292	560,989	553,219	621,098	21,0	21,0	40018,52	16,72	8,67
498,421	490,778	556,299	548,395	615,639	21,5	21,6	40087,29	17,10	8,64
501,668	492,883	555,442	547,381	614,169	20,6	20,7	39994,38	17,97	8,50
499,580	489,662	551,193	542,869	609,132	20,0	20,1	40114,70	18,27	8,49
502,590	491,178	551,626	543,195	608,933	20,3	20,4	39969,37	19,09	8,39
500,811	488,921	546,193	537,478	602,675	20,6	20,7	40052,04	19,25	8,36
500,322	487,573	542,973	534,042	598,542	21,2	21,3	40048,22	19,71	8,22
499,458	486,107	540,885	531,842	596,182	21,5	21,6	40095,49	19,90	8,16
501,148	486,683	535,862	526,151	589,416	20,9	21,1	40018,84	20,82	8,08
501,720	486,314	531,182	520,948	583,642	20,2	20,4	40003,89	21,40	7,84
502,213	487,532	524,199	512,643	570,025	20,5	20,5	39912,03	22,16	7,62
502,485	486,238	516,747	504,220	559,368	21,2	21,3	39909,21	23,02	7,39
499,382	482,261	497,886	482,688	512,331	20,1	20,3	40054,83	24,08	6,51
498,660	480,693	496,291	481,023	507,660	20,5	20,6	40072,30	24,20	6,39
502,469	485,547	495,071	478,898	489,902	21,1	21,1	39845,83	24,90	5,82

Tabela I.86 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 40000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
700,761	770,302	852,969	847,076	925,678	19,9	20,0	40022,34	0,00	10,79
701,527	770,284	852,529	846,678	925,137	20,5	20,5	39951,89	1,33	10,70
698,317	766,007	847,415	841,181	918,792	21,0	21,0	40115,26	2,55	10,65
699,044	766,025	846,893	840,585	917,856	20,8	20,9	40020,10	3,82	10,57
695,169	760,808	841,105	834,617	911,139	20,1	20,3	40186,64	4,60	10,47
700,598	765,291	845,141	838,761	915,183	20,3	20,3	39908,29	6,23	10,40
697,334	761,535	840,736	834,226	910,072	20,8	20,8	40104,25	6,64	10,48
695,872	759,082	837,927	831,250	906,998	20,9	21,0	40111,61	7,26	10,41
699,337	761,782	840,615	833,698	910,103	21,3	21,4	40029,48	7,96	10,35
699,562	761,381	840,128	833,183	909,319	20,8	20,9	40006,92	8,42	10,33
698,027	758,684	837,138	829,858	905,686	20,5	20,6	40102,38	9,03	10,31
700,690	760,925	839,440	832,192	908,014	20,4	20,5	39980,61	9,52	10,30
697,957	755,729	833,856	826,331	901,506	20,8	20,9	40014,71	10,31	10,25
700,761	758,129	832,797	825,729	900,921	21,1	21,1	39927,33	11,24	10,18
698,896	755,372	828,076	821,165	895,580	21,4	21,5	40043,14	11,93	10,14
699,064	752,607	824,576	817,716	891,868	21,0	21,1	40038,70	12,82	10,10
698,190	744,848	817,180	809,963	883,334	20,5	20,6	40080,76	13,53	10,02
698,628	738,905	810,831	803,565	875,984	20,4	20,4	40078,41	14,88	9,87
700,044	728,795	800,058	793,027	864,958	21,2	21,2	39990,28	16,09	9,65
698,916	721,618	792,447	785,364	856,451	21,5	21,6	40022,99	16,91	9,49
698,330	714,220	784,667	777,368	847,729	21,3	21,4	40058,83	17,91	9,35
700,143	714,661	784,780	777,524	847,836	20,9	21,0	39984,84	18,42	9,30
698,902	709,571	779,252	771,968	841,656	20,5	20,6	40026,50	19,10	9,24
699,936	706,863	776,158	768,907	838,116	20,0	20,1	40020,13	19,86	9,12
700,605	704,405	772,668	765,325	833,773	20,4	20,5	39999,25	21,03	9,00
699,501	699,491	767,608	760,170	828,198	20,7	20,7	40018,80	21,59	8,91
698,434	698,109	764,907	757,479	824,791	20,9	21,0	40052,53	22,22	8,86
699,979	697,679	764,160	756,676	823,946	21,3	21,3	39983,77	22,68	8,77

700,247	697,595	764,007	756,433	823,552	20,9	21,0	39965,30	23,05	8,74
699,025	693,807	759,011	751,421	817,591	20,5	20,7	40031,73	23,92	8,64
699,456	693,012	756,965	749,177	815,087	20,3	20,4	40015,77	24,59	8,58

Tabela I.87 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,895	146,064	200,201	187,906	234,235	20,5	20,6	50068,49	0,00	10,62
101,558	138,249	188,948	176,014	220,364	21,2	21,3	49979,94	1,13	10,44
99,326	137,160	186,929	173,835	217,288	20,6	20,7	50059,56	1,22	10,45
101,004	135,598	184,655	171,265	214,196	20,4	20,4	50013,91	1,46	10,38
101,220	132,633	180,768	167,331	209,793	21,2	21,2	50016,08	1,52	10,35
100,054	129,980	176,379	162,613	204,217	20,6	20,7	50047,95	1,73	10,70
101,551	127,719	173,709	159,913	201,208	20,1	20,2	50001,34	1,84	10,34
100,568	121,303	164,917	150,723	190,778	20,9	20,9	50034,78	1,98	10,03
102,248	96,362	133,256	118,410	154,717	21,4	21,5	49951,86	2,15	9,86
100,611	72,279	96,212	79,310	102,038	20,3	20,5	50029,30	2,25	8,70

Tabela I.88 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
301,759	347,257	401,599	388,997	434,535	20,8	20,9	50007,44	0,00	10,73
301,879	343,849	396,966	383,959	427,774	20,8	20,9	49994,68	1,54	10,53
299,213	341,922	394,380	381,172	424,233	21,5	21,6	50051,63	1,92	10,59
301,227	341,122	393,237	380,047	423,112	20,7	20,7	49986,69	2,27	10,54
299,977	339,649	391,324	378,121	420,568	21,3	21,4	50000,14	2,58	10,49
300,183	340,337	391,009	377,741	419,591	20,7	20,8	50014,76	2,97	10,45
300,655	338,024	387,727	374,375	415,766	20,2	20,3	49990,13	3,47	10,40
300,008	336,288	384,825	371,291	411,677	21,1	21,2	49967,80	4,09	10,28
300,187	334,503	382,247	368,567	408,111	21,4	21,5	49969,40	4,54	10,23
300,487	332,032	379,421	365,489	404,243	20,9	21,0	49971,69	4,92	10,19
301,323	330,033	376,759	362,752	400,966	20,5	20,6	49927,14	5,41	10,11
300,021	326,131	370,969	356,718	393,750	20,6	20,7	49971,44	5,92	10,03
301,405	321,991	366,425	351,763	387,606	21,4	21,5	49934,87	6,40	9,90
301,190	312,463	355,666	340,635	375,346	21,0	21,1	49946,52	6,80	9,74
302,586	301,507	344,062	328,325	362,174	20,2	20,3	49910,18	7,20	9,47
301,259	278,498	319,485	302,917	334,026	21,1	21,2	49906,52	7,67	9,01
301,029	268,928	308,066	291,151	320,211	21,3	21,4	49952,87	8,06	8,62
299,657	259,246	295,593	278,278	304,321	20,6	20,7	49969,43	8,71	8,46
300,544	258,134	293,534	276,009	301,145	20,5	20,6	49982,91	8,94	8,19
299,382	251,446	283,628	265,539	287,340	21,4	21,4	50007,11	9,49	7,94
301,880	250,618	280,784	262,439	281,903	20,3	20,4	49894,93	10,10	7,83
300,516	246,711	273,722	254,761	270,707	21,3	21,5	49933,70	10,50	7,84
299,507	240,830	261,298	241,069	246,404	20,8	20,9	50155,96	11,02	7,25

303,235	243,180	259,836	239,146	235,610	21,3	21,4	50043,15	11,37	6,76
---------	---------	---------	---------	---------	------	------	----------	-------	------

Tabela I.89 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,048	546,488	600,537	587,412	632,246	21,4	21,4	50080,58	0,00	10,90
499,781	544,805	598,254	585,232	629,314	21,4	21,5	50059,51	1,25	10,80
499,501	543,594	596,497	583,313	626,435	21,1	21,3	50026,69	2,34	10,77
500,203	544,144	596,532	583,172	626,022	20,6	20,7	50064,11	2,65	10,76
500,181	541,900	593,442	579,899	621,677	21,4	21,5	49980,86	4,15	10,55
501,702	541,323	591,726	577,889	618,439	20,7	20,8	50101,35	4,84	10,73
502,753	540,097	589,983	576,164	616,502	21,3	21,3	50073,91	5,27	10,64
503,033	539,477	589,285	575,262	615,207	21,8	21,9	50044,68	5,75	10,58
502,380	539,403	588,246	574,212	613,736	21,5	21,6	50098,00	5,99	10,41
500,829	537,265	585,646	571,473	610,261	21,1	21,1	50145,99	6,44	10,60
501,997	535,351	583,723	569,323	607,460	21,6	21,7	50093,34	7,03	10,43
502,056	534,170	581,974	567,467	605,236	22,1	22,1	50102,34	7,46	10,47
501,133	533,129	579,605	564,936	601,983	21,8	21,9	50098,23	8,12	10,31
502,239	532,003	578,604	563,912	600,455	21,4	21,5	50093,76	8,60	10,27
500,089	528,237	574,293	559,201	595,186	20,8	20,9	50154,45	8,88	10,20
500,992	529,178	574,673	559,599	595,556	21,1	21,2	50132,91	9,14	10,28
502,086	529,159	574,718	559,436	595,052	21,6	21,6	50102,65	9,45	10,22
502,657	527,663	572,703	557,208	592,399	22,0	22,0	50051,94	10,09	10,09
501,783	525,423	569,832	554,091	588,589	22,0	22,1	50078,90	10,50	10,04
499,763	521,198	564,874	548,599	582,003	21,5	21,6	50153,69	10,98	10,13
500,985	518,199	561,281	544,772	577,646	21,2	21,3	50118,70	11,57	9,88
501,657	505,956	547,839	531,033	562,370	21,7	21,8	50072,72	12,65	9,70
501,328	500,040	541,465	524,478	555,165	21,9	22,1	50090,89	12,92	9,60
503,097	489,656	530,486	513,302	543,265	21,6	21,7	50018,21	13,58	9,26
503,204	482,214	522,490	505,200	534,353	21,2	21,3	50007,55	14,05	8,99
502,407	473,594	512,797	495,242	523,037	21,0	21,0	50037,63	14,56	8,97
501,336	467,302	505,180	487,375	513,774	21,5	21,5	50080,77	15,11	8,83
501,638	463,941	501,160	483,169	508,613	21,9	22,1	50059,83	15,57	8,60
501,960	460,684	496,857	478,799	503,204	21,6	21,7	50033,00	16,15	8,50
501,367	456,477	491,712	473,315	496,439	21,3	21,4	50048,64	16,60	8,32
501,702	454,924	489,457	471,039	493,458	21,1	21,2	50042,15	16,98	8,25
501,104	451,201	484,318	465,634	486,380	20,8	21,0	50054,14	17,56	8,02
500,782	447,514	478,433	459,353	477,767	21,2	21,3	50065,99	18,44	7,82
500,679	444,450	473,267	453,861	470,119	22,0	22,1	50026,21	19,26	7,60
502,251	443,169	470,075	450,329	464,470	21,3	21,5	49996,63	20,07	7,41
502,416	440,727	464,371	444,153	455,139	21,0	21,1	50015,35	20,93	7,26
503,202	439,302	460,058	439,242	446,591	21,0	21,1	49995,48	21,85	7,06
502,726	435,214	450,796	429,029	430,369	21,5	21,5	50026,86	22,76	6,79

Tabela I.90 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
699,521	745,087	798,818	785,491	828,971	21,4	21,5	50118,87	0,00	10,53
699,910	741,416	794,081	780,713	823,575	20,9	21,0	50099,89	2,24	10,38
702,223	742,237	793,912	780,418	822,289	20,5	20,6	50026,75	4,25	10,32
701,085	742,744	793,656	779,999	820,903	21,5	21,6	50039,88	5,46	10,31
699,731	736,676	786,447	772,695	812,584	21,4	21,5	50078,25	6,63	10,11
699,451	735,847	785,335	771,486	811,079	21,1	21,3	50055,36	7,17	10,11
701,750	737,530	786,784	772,967	812,343	20,6	20,7	50032,80	7,78	10,08
699,487	734,901	783,020	769,049	807,475	21,1	21,2	50081,82	8,70	10,02
701,025	737,559	785,597	771,529	809,594	21,5	21,5	50024,73	9,27	10,05
701,025	736,134	783,536	769,427	807,039	21,6	21,7	49997,16	10,07	10,01
700,618	734,820	781,712	767,473	804,832	21,2	21,3	50015,91	10,46	10,00
700,181	730,796	777,692	763,092	799,452	20,7	20,9	50027,70	11,40	9,93
699,152	729,564	774,913	760,221	795,876	20,5	20,6	50058,58	12,29	9,90
701,398	730,345	775,991	761,269	796,621	20,5	20,5	49983,63	12,85	9,90
700,174	727,586	771,919	756,997	791,621	21,0	21,1	50012,35	13,60	9,84
699,946	724,649	768,334	753,163	786,603	21,4	21,4	50010,51	14,80	9,76
698,213	719,439	762,528	746,681	778,938	21,7	21,8	50054,14	15,80	9,67
700,416	719,782	762,093	746,517	778,846	21,4	21,5	49965,51	16,41	9,63
700,713	715,810	757,350	741,335	772,480	21,2	21,3	49960,10	17,58	9,52
699,079	706,976	747,582	731,111	760,667	20,8	21,0	50044,32	18,55	9,36
699,519	700,339	740,163	723,269	751,948	20,6	20,7	50036,53	19,56	9,21
700,417	690,646	730,158	712,898	740,737	20,6	20,7	49996,31	20,35	8,96
701,367	682,297	721,308	703,761	730,697	21,1	21,1	49927,03	21,25	8,73
700,372	674,863	713,225	695,512	721,667	21,7	21,8	49908,30	21,95	8,54
699,167	668,530	705,933	688,061	713,105	21,5	21,7	49977,38	22,53	8,38
699,611	665,425	702,392	684,443	708,744	21,1	21,2	49959,72	23,09	8,28
699,796	661,365	697,438	679,336	702,583	20,8	20,9	49956,70	23,88	8,13
700,413	655,924	690,253	671,865	693,179	20,5	20,7	49962,78	25,26	7,92
705,763	654,284	686,328	667,657	686,755	20,8	20,8	49772,23	27,62	7,59

Tabela I.91 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,021	136,713	184,123	177,592	223,189	20,5	20,6	20497,43	0,00	4,70
100,284	135,401	181,084	174,560	219,014	20,1	20,1	20486,51	1,22	4,87
100,111	126,793	170,899	164,439	207,995	20,4	20,4	20512,99	1,79	4,68
100,286	122,273	165,397	158,901	201,978	20,6	20,7	20512,20	2,23	4,60
100,974	119,815	162,299	155,972	198,956	20,9	21,0	20439,03	2,44	4,57
99,914	116,765	158,687	152,384	194,960	20,9	21,0	20536,70	2,60	4,54
100,301	115,068	156,039	149,762	191,985	20,2	20,4	20502,44	2,93	4,36
100,760	112,105	152,045	145,824	186,807	20,0	20,0	20510,21	3,22	4,19
100,792	110,693	149,984	143,727	183,842	20,2	20,2	20481,62	3,44	3,96

100,520	108,332	146,304	140,082	177,774	20,4	20,5	20513,51	3,85	4,05
100,198	106,661	140,842	134,934	170,309	20,9	20,9	20547,62	4,25	3,86
101,070	106,659	137,466	131,704	165,087	20,3	20,4	20483,08	4,59	3,73
101,681	106,913	133,761	128,256	160,489	19,9	19,9	20421,44	4,84	3,57
101,775	106,272	122,926	117,574	143,511	20,0	20,1	20407,89	5,13	3,02
101,061	104,462	112,863	107,231	113,802	20,4	20,4	20472,49	5,68	2,30
100,945	103,715	110,614	104,973	110,030	20,7	20,7	20502,62	5,98	2,19
100,665	102,890	108,986	103,300	107,263	20,8	20,8	20527,71	6,21	2,06
100,560	102,041	106,742	100,843	103,340	20,8	20,9	20529,56	6,65	1,95
101,266	102,066	105,882	100,062	101,438	20,9	21,0	20450,80	7,13	1,86
100,543	100,875	103,780	97,753	98,230	20,5	20,6	20544,77	7,41	1,76
100,487	100,235	102,458	96,336	95,633	19,8	20,0	20569,88	7,76	1,76
100,600	99,634	101,429	95,516	94,531	19,9	19,9	20548,82	8,09	1,76
100,857	99,540	100,878	94,870	93,297	20,0	20,0	20528,32	8,48	1,71
101,035	99,390	100,350	94,422	92,161	20,1	20,1	20496,68	8,83	1,61
101,116	99,153	99,790	93,716	90,745	20,2	20,2	20493,31	9,17	1,67

Tabela I.92 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
299,493	336,237	383,779	377,137	422,569	20,1	20,2	20469,62	0,00	4,79
301,775	337,422	383,733	377,060	421,397	20,0	20,0	20517,89	1,58	4,70
297,451	332,751	378,067	371,503	415,190	20,2	20,3	20679,20	2,15	4,65
300,080	335,485	381,034	374,311	418,108	20,5	20,6	20433,17	2,43	4,62
298,964	331,293	376,084	369,495	412,765	20,7	20,8	20514,91	2,79	4,55
300,165	330,902	375,502	368,854	412,020	20,9	20,9	20425,81	3,22	4,52
299,309	327,535	371,449	364,859	407,681	21,0	21,1	20531,72	3,51	4,46
299,283	325,439	368,971	362,338	404,955	20,3	20,4	20524,25	3,83	4,40
299,634	324,950	368,252	361,763	404,220	20,4	20,5	20480,84	4,12	4,38
298,942	321,444	364,013	357,572	399,671	20,6	20,7	20528,04	4,69	4,30
298,976	320,238	362,239	355,786	397,682	20,8	20,8	20543,47	5,14	4,26
300,080	319,826	361,477	355,046	396,713	20,9	20,9	20454,73	5,53	4,20
299,523	318,121	359,210	352,815	394,027	21,0	21,1	20496,27	5,88	4,16
300,305	316,269	356,741	350,404	391,014	21,2	21,3	20444,67	6,29	4,05
300,391	315,731	355,876	349,470	389,543	20,7	20,8	20449,71	6,57	4,01
299,813	314,620	354,210	347,810	386,935	20,2	20,3	20482,55	6,93	3,96
300,171	313,717	353,194	346,721	385,231	20,0	20,0	20446,94	7,14	3,90
299,100	311,726	350,653	344,186	381,574	20,1	20,2	20548,89	7,48	3,85
299,942	311,728	350,400	343,953	380,568	20,3	20,3	20474,65	7,71	3,80
298,942	309,724	347,790	341,423	377,027	20,4	20,4	20567,98	8,06	3,74
299,783	309,670	347,164	340,613	374,888	20,6	20,7	20499,98	8,60	3,66
300,135	309,664	346,492	340,044	373,765	20,8	20,9	20458,10	8,84	3,63
299,059	307,662	343,214	336,785	369,349	21,0	21,0	20572,68	9,17	3,58
300,070	308,312	342,807	336,530	368,475	21,1	21,2	20473,05	9,44	3,52
299,647	307,604	340,452	334,285	365,393	20,9	21,0	20513,04	9,72	3,46
299,602	306,659	337,596	331,369	361,365	20,1	20,1	20522,10	10,28	3,47
299,764	306,751	336,687	330,652	359,941	20,4	20,4	20504,56	10,47	3,97
299,080	304,949	331,801	325,908	354,574	20,6	20,6	20572,88	11,16	3,81



299,160	304,283	327,038	321,444	348,933	21,0	21,0	20558,78	11,85	3,66
299,469	304,030	323,035	317,405	341,867	20,9	21,0	20556,58	12,43	3,44
300,961	305,332	320,441	314,701	332,430	19,9	20,0	20404,01	12,94	3,08
299,363	303,167	314,978	309,061	318,222	20,1	20,1	20593,37	13,29	2,67
300,280	303,961	315,034	309,081	317,320	20,2	20,3	20502,97	13,54	2,61
299,776	302,840	311,498	305,375	310,798	20,5	20,6	20541,16	14,22	2,41
299,049	301,956	310,549	304,416	309,606	20,7	20,7	20582,23	14,20	2,40
300,730	303,060	310,929	304,925	309,187	21,0	21,0	20417,75	15,00	2,31
299,492	301,473	307,973	301,861	304,936	20,4	20,6	20566,55	15,24	2,24
300,008	301,344	306,578	300,224	301,771	20,1	20,1	20546,71	16,36	2,12
300,218	301,175	306,108	299,810	301,058	20,4	20,5	20517,88	16,66	2,10
300,297	300,617	304,420	297,948	297,911	20,6	20,7	20528,81	17,60	2,02
300,017	299,085	301,651	295,747	294,803	20,8	20,9	20532,85	18,55	1,98
299,648	298,258	299,899	293,560	291,305	21,1	21,1	20581,82	19,73	1,91

Tabela I.93 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
499,234	536,222	583,478	576,729	621,475	20,1	20,1	20600,36	0,00	4,55
499,382	536,166	582,790	576,146	620,563	20,7	20,9	20579,44	1,12	4,37
499,888	536,411	582,853	576,146	620,357	19,9	20,0	20531,80	1,55	4,36
500,390	536,565	582,493	575,789	619,551	20,2	20,2	20593,33	2,32	4,31
500,535	536,567	582,251	575,492	618,963	20,5	20,5	20512,47	2,90	4,28
499,798	535,673	580,828	574,204	617,322	20,7	20,8	20605,45	3,29	4,28
499,933	535,510	580,529	573,843	616,802	20,9	20,9	20600,66	3,78	4,26
500,452	535,201	579,920	573,167	615,903	20,2	20,3	20587,26	4,27	4,25
501,192	534,574	579,136	572,395	615,068	19,6	19,7	20536,75	4,64	4,23
500,013	532,158	576,252	569,567	611,975	19,7	19,8	20634,28	5,02	4,21
500,463	530,664	574,686	567,970	610,181	19,9	19,9	20594,64	5,40	4,14
500,483	528,556	572,226	565,430	607,803	20,0	20,1	20364,60	6,01	4,08
501,124	528,065	571,290	564,605	606,542	20,2	20,3	20524,37	6,41	4,06
499,609	524,880	567,657	561,023	602,540	20,4	20,4	20653,02	6,87	4,04
500,730	523,988	566,091	559,511	600,961	21,0	21,1	20588,35	7,44	3,96
500,485	523,770	565,756	559,159	600,261	21,1	21,2	20601,39	7,83	3,96
501,047	523,122	564,774	558,153	599,259	20,6	20,8	20527,19	8,32	3,91
501,372	522,260	563,617	556,987	597,938	20,0	20,1	20465,10	8,78	3,87
500,740	520,302	561,112	554,482	594,748	20,1	20,2	20518,67	9,44	3,83
500,681	521,284	562,439	555,823	596,419	20,6	20,7	20548,88	9,03	3,89
500,230	518,750	559,158	552,540	592,307	19,8	19,8	20598,39	9,92	3,83
500,642	517,885	557,910	551,369	590,659	20,0	20,1	20572,39	10,25	3,77
501,083	518,514	558,435	551,822	590,690	20,2	20,2	20517,30	10,56	3,78
499,228	514,756	553,989	547,420	585,235	20,3	20,3	20702,66	11,11	3,71
500,891	516,087	555,105	548,421	585,690	20,5	20,6	20538,32	11,51	3,67
501,328	515,760	554,526	547,885	584,700	20,6	20,7	20473,22	11,80	3,61
501,322	515,410	553,823	547,183	583,178	20,7	20,8	20497,50	12,21	3,58
501,571	514,987	553,282	546,563	581,972	20,8	20,9	20478,33	12,48	3,53
500,027	512,262	549,923	543,275	577,177	21,0	21,1	20582,84	13,14	3,48
500,237	512,124	549,446	542,772	575,972	21,0	21,2	20637,26	13,56	3,45



501,111	512,084	549,127	542,403	574,730	20,6	20,7	20554,24	14,03	3,39
500,106	510,526	546,764	540,113	571,558	20,1	20,3	20643,51	14,53	3,36
500,878	510,554	545,267	538,740	569,479	20,1	20,2	20576,05	15,12	3,29
500,329	509,488	542,146	535,654	565,578	20,3	20,4	20589,89	15,64	3,24
500,450	509,226	540,062	533,562	562,535	20,5	20,6	20529,54	16,35	3,14
501,059	509,546	539,505	532,977	561,372	20,6	20,7	20485,17	16,66	3,10
501,624	509,813	539,534	533,035	561,009	20,7	20,8	20444,98	16,89	3,07
502,622	510,525	539,377	532,967	560,330	20,8	20,9	20347,75	17,43	3,01
499,943	506,651	533,235	527,066	553,925	21,1	21,2	20595,30	18,24	2,98
499,441	506,459	533,844	527,553	554,634	20,8	21,0	20659,60	17,82	3,01
501,337	507,955	534,483	528,186	554,739	20,4	20,4	20491,38	18,71	2,96
500,491	506,285	530,309	524,217	550,371	20,5	20,6	20554,23	19,57	2,90
501,549	506,912	529,263	523,260	548,394	20,6	20,7	20482,94	20,33	2,83
499,694	503,895	521,044	514,949	535,882	20,7	20,8	20679,27	21,59	2,61
501,683	505,326	519,662	513,551	527,860	20,8	20,9	20467,53	22,93	2,28
500,758	503,994	515,959	509,623	519,027	21,0	21,1	20544,66	23,60	2,05
500,464	502,978	512,677	506,281	512,984	20,9	21,0	20551,00	24,73	1,89
499,460	501,495	509,461	502,940	507,628	20,5	20,6	20669,11	25,43	1,77
500,194	502,211	510,091	503,505	508,017	20,0	20,1	20576,25	25,89	1,76
499,864	501,174	507,527	500,916	503,687	20,2	20,2	20645,05	26,89	1,65
500,886	501,883	507,648	501,072	503,208	20,3	20,4	20543,71	27,91	1,61
499,872	499,814	503,761	497,519	497,822	20,5	20,5	20640,74	28,80	1,51
501,105	500,937	504,537	498,354	498,112	20,6	20,6	20519,28	30,08	1,46
500,528	499,768	502,264	495,987	494,503	20,7	20,8	20605,07	31,37	1,42
500,932	500,004	502,338	496,009	494,250	20,9	20,9	20552,47	31,99	1,39
500,478	499,086	500,749	494,259	491,580	21,0	21,1	20672,50	32,70	1,36
501,875	500,062	501,331	494,850	491,350	20,9	21,0	20567,08	34,30	1,31

Tabela I.94 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 20500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
700,008	736,824	783,845	777,163	821,543	21,1	21,1	20674,73	0,00	5,05
702,130	738,835	785,653	779,017	823,300	21,0	21,2	20494,76	0,90	5,03
702,459	738,467	784,031	777,434	820,538	21,1	21,1	20525,13	3,53	4,87
701,146	736,774	781,693	775,114	817,770	20,9	21,0	20669,85	4,44	4,85
699,472	734,833	779,569	773,034	815,526	20,3	20,4	20568,78	5,12	4,83
700,026	735,454	780,226	773,662	816,144	21,1	21,1	20446,74	5,38	4,84
700,510	735,844	780,433	773,921	816,338	21,3	21,3	20410,31	5,79	4,80
699,896	733,076	777,119	770,548	812,490	20,7	20,8	20476,68	6,75	4,76
698,398	728,364	771,701	765,151	806,584	20,1	20,3	20650,23	7,50	4,68
699,833	728,232	771,289	764,667	806,067	20,0	20,1	20508,08	8,50	4,61
700,668	726,261	768,740	762,173	803,459	20,2	20,2	20409,12	9,30	4,53
698,358	723,246	765,190	758,662	799,322	20,4	20,4	20653,54	10,02	4,52
700,130	722,959	764,457	757,911	798,541	20,6	20,7	20479,88	10,95	4,43
700,417	721,943	763,040	756,613	797,014	21,0	21,1	20436,70	11,65	4,52
699,890	720,460	760,969	754,394	794,019	21,2	21,3	20493,98	12,86	4,45
699,275	718,198	758,086	751,622	790,544	20,8	20,9	20555,66	13,67	4,34
699,961	718,017	757,679	751,195	789,480	20,0	20,2	20522,30	14,44	4,32

700,765	718,065	757,326	750,810	788,407	20,1	20,1	20460,78	15,17	4,27
698,455	714,504	753,119	746,578	782,937	20,2	20,3	20669,55	16,05	4,22
699,345	714,016	752,166	745,681	781,007	20,4	20,4	20579,57	16,85	4,15
700,557	714,268	751,964	745,452	779,338	20,5	20,6	20460,83	17,94	4,06
698,503	711,069	748,157	741,594	773,891	20,7	20,7	20624,43	18,79	3,99
700,655	712,434	748,974	742,387	773,839	20,9	20,9	20469,89	19,74	3,94
699,539	710,267	745,567	739,098	768,968	21,1	21,2	20587,17	20,85	3,87
700,146	710,307	743,724	737,290	766,431	21,3	21,3	20514,74	21,55	3,82
700,952	710,766	742,904	736,500	764,965	20,9	21,0	20430,87	22,19	3,75
699,156	708,029	737,592	731,273	758,921	20,1	20,2	20617,43	23,13	3,68
700,048	708,290	736,551	730,272	757,137	20,2	20,3	20571,23	24,10	3,60
700,568	708,624	736,380	730,172	756,577	20,4	20,5	20525,14	24,53	3,57
698,639	705,656	732,095	725,953	751,934	20,6	20,7	20697,78	25,49	3,52
699,841	706,295	731,259	725,090	750,325	20,9	21,0	20610,87	26,78	3,72
699,983	706,202	730,495	724,426	749,395	21,1	21,2	20560,32	27,27	3,62
700,082	705,802	728,291	722,299	746,346	21,0	21,1	20550,93	28,55	3,08

Tabela I.95 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 27400 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,059	130,424	168,442	162,731	198,493	20,4	20,5	27389,55	0,00	4,78
100,453	127,823	164,078	157,870	192,160	20,9	20,9	27378,96	1,57	4,64
99,672	126,081	161,975	155,730	189,644	20,3	20,4	27427,84	1,77	4,62
100,497	114,897	150,470	144,348	177,666	19,9	20,0	27389,91	2,12	4,43
99,880	105,640	140,560	134,376	166,997	20,3	20,3	27434,67	2,37	4,18
100,357	101,941	136,084	129,902	161,999	20,5	20,5	27395,76	2,68	4,02
100,836	97,505	128,304	122,793	154,305	20,6	20,7	27388,78	2,93	3,83
101,367	95,383	124,930	119,319	150,167	20,7	20,8	27342,47	3,32	3,70
101,833	94,406	122,846	117,331	147,584	20,8	20,9	27309,84	3,64	3,62
101,100	92,021	118,519	112,757	141,939	20,9	21,0	27357,80	3,95	3,56
100,762	90,228	87,132	76,605	67,951	19,7	19,8	27410,87	4,30	2,05
99,888	88,378	81,870	70,745	57,122	19,9	20,0	27460,25	4,56	1,85
102,691	91,027	82,702	71,402	55,365	20,1	20,2	27284,69	5,02	1,71

Tabela I.96 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 27400 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
300,349	331,000	368,999	362,983	398,523	20,7	20,7	27387,68	0,00	4,81
299,785	329,084	366,226	360,415	395,067	20,9	21,0	27422,11	1,38	4,78
300,382	329,252	365,826	359,837	394,043	21,1	21,1	27389,83	2,07	4,74
298,485	326,454	362,777	356,606	390,410	20,3	20,5	27523,32	2,40	4,72
300,307	328,268	364,624	358,345	392,441	20,1	20,2	27392,47	2,57	4,71
300,788	328,481	364,534	358,302	392,039	20,4	20,4	27366,84	2,96	4,70
300,331	327,610	363,418	357,129	390,641	20,5	20,5	27423,86	3,24	4,68

299,830	326,717	362,322	355,948	389,282	20,7	20,7	27417,25	3,47	4,66
299,858	326,212	361,656	355,290	388,345	20,8	20,8	27417,62	3,73	4,64
299,771	324,279	359,252	352,931	385,560	20,9	21,0	27428,24	4,18	4,60
301,211	317,725	352,712	346,439	378,736	20,5	20,6	27341,81	4,75	4,45
299,101	310,684	345,130	338,792	370,514	20,1	20,1	27458,72	5,10	4,32
299,532	302,624	333,698	328,152	358,889	20,8	20,8	27445,34	5,86	4,04
300,643	301,345	332,257	326,602	357,084	20,9	21,0	27389,70	6,28	3,95
299,927	298,566	328,942	323,347	353,555	20,7	20,9	27419,54	6,70	3,88
300,574	296,944	326,910	321,288	351,173	19,9	20,0	27406,10	7,04	3,80
299,688	294,443	323,577	317,933	347,322	20,2	20,3	27449,35	7,49	3,74
300,269	294,145	323,087	317,393	346,492	20,4	20,5	27413,33	7,84	3,70
300,107	292,474	320,372	314,609	343,025	20,6	20,6	27427,38	8,50	3,62
300,648	292,560	319,764	313,892	341,870	20,8	20,8	27382,96	8,86	3,57
300,654	291,807	318,321	312,408	339,790	20,9	21,0	27391,63	9,23	3,53
299,484	289,696	315,058	309,008	335,476	19,9	20,0	27481,53	9,67	3,51
299,149	288,553	312,538	306,267	331,669	20,1	20,1	27487,02	10,15	3,43
299,659	288,394	287,411	277,130	271,089	20,6	20,7	27437,48	10,66	2,06
300,841	289,085	285,723	274,975	267,159	20,9	20,9	27388,10	11,08	1,88
300,942	288,790	282,970	271,826	261,858	21,0	21,1	27361,56	11,55	1,71

Tabela I.97 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 27400 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,101	531,759	569,695	563,609	598,504	20,8	20,9	27450,73	0,00	5,41
500,319	529,958	567,064	560,758	594,952	20,0	20,2	27510,07	1,87	5,39
500,633	529,236	565,599	559,230	592,760	20,3	20,4	27527,00	3,22	5,14
500,963	529,741	566,008	559,632	593,122	20,8	20,8	27487,27	3,40	5,49
497,758	525,683	561,428	554,953	587,791	20,9	21,0	27696,77	3,95	5,54
500,638	528,744	564,621	558,220	591,288	21,2	21,2	27504,71	4,27	4,91
499,938	527,530	563,068	556,538	589,333	20,5	20,6	27566,14	4,81	4,92
499,571	526,457	561,695	555,086	587,594	20,0	20,1	27596,26	5,31	4,90
500,267	526,775	561,862	555,303	587,736	20,2	20,3	27553,08	5,73	4,90
500,281	526,843	561,920	555,343	587,614	20,4	20,5	27520,72	5,88	5,00
499,264	524,689	559,272	552,654	584,560	20,6	20,6	27590,89	6,45	4,94
499,248	523,556	557,950	551,285	582,869	20,8	20,8	27615,43	6,92	4,97
499,887	523,655	558,079	551,405	582,845	20,9	21,0	27567,70	7,15	4,92
500,696	519,813	554,177	547,559	578,820	21,1	21,1	27496,07	7,72	4,82
500,008	514,087	548,075	541,413	572,348	21,2	21,2	27531,55	8,19	4,60
499,892	511,489	545,163	538,557	569,072	20,6	20,7	27561,73	8,78	4,96
500,162	510,417	541,343	535,519	565,805	20,2	20,3	27557,10	8,97	4,77
500,518	507,622	538,249	532,458	562,501	20,5	20,5	27529,86	9,44	4,11
500,689	503,699	534,343	528,573	558,275	20,7	20,7	27519,86	9,82	4,17
500,657	502,531	532,760	527,064	556,560	21,0	21,0	27515,36	10,12	4,14
499,030	497,989	527,691	521,967	550,837	21,2	21,2	27632,98	10,84	4,18
500,501	499,005	528,603	522,896	551,921	20,9	21,0	27506,42	11,17	4,13
500,447	496,129	525,304	519,493	548,005	20,4	20,5	27553,83	11,90	4,00
501,011	496,378	525,307	519,535	547,988	20,3	20,3	27487,55	12,27	3,97
499,612	493,623	521,796	515,974	543,751	20,5	20,5	27607,76	12,88	3,92

500,109	493,349	520,945	515,076	542,332	20,6	20,7	27557,47	13,56	3,86
499,740	492,191	519,260	513,194	540,009	20,8	20,9	27600,33	13,97	3,82
500,673	492,589	519,181	513,073	539,386	21,0	21,0	27533,82	14,56	3,78
499,957	491,122	517,263	511,061	536,946	21,1	21,2	27552,39	15,00	3,81
501,156	491,905	517,428	511,200	536,602	20,9	21,0	27514,58	15,56	3,84
499,704	489,384	513,929	507,607	531,927	20,5	20,7	27606,53	16,20	3,66
500,917	490,373	514,304	508,033	531,679	20,0	20,2	27550,24	16,74	3,60
500,828	490,069	512,957	506,596	529,290	20,1	20,2	27543,65	17,44	3,57
500,109	488,617	507,557	500,703	521,475	20,3	20,3	27606,86	17,97	3,70
506,733	496,639	512,796	505,587	506,584	20,4	20,4	27146,48	18,09	3,12
501,299	489,175	486,938	476,253	468,837	20,6	20,7	27513,90	18,85	2,17
501,681	489,052	484,637	473,451	464,358	20,8	20,8	27485,16	19,46	2,02

Tabela I.98 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0,BEP} = 27400 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
700,274	731,065	768,629	762,603	796,990	20,6	20,7	27426,68	0,00	4,75
700,872	730,937	767,823	761,666	795,584	21,1	21,2	27378,49	2,21	4,77
701,673	731,099	767,668	761,380	794,961	21,3	21,4	27354,66	3,36	4,71
701,051	729,963	766,117	759,801	792,830	20,6	20,8	27493,03	4,15	5,26
699,716	728,223	764,012	757,672	790,537	20,1	20,2	27297,96	5,67	4,93
699,047	727,140	762,612	756,171	788,713	20,8	20,8	27340,90	6,34	4,93
701,662	729,180	764,288	757,697	789,765	21,0	21,1	27502,91	6,84	4,90
701,304	728,142	762,822	756,286	787,931	21,3	21,4	27551,28	7,61	4,97
702,208	728,192	762,692	756,014	787,526	21,5	21,5	27475,85	8,32	5,80
700,683	725,904	760,098	753,345	784,438	21,2	21,3	27567,57	9,07	4,51
700,833	725,340	759,417	752,665	783,687	20,8	20,9	27540,29	9,65	4,53
702,516	725,405	759,417	752,795	783,630	20,4	20,5	27463,38	10,27	4,49
700,456	719,022	752,658	745,926	776,118	20,5	20,5	27589,05	11,15	4,41
702,283	719,563	753,226	746,501	776,767	20,7	20,7	27437,13	11,60	4,39
701,387	715,200	748,463	741,819	771,597	20,8	20,9	27471,03	12,30	4,32
702,421	713,754	744,100	738,246	767,590	21,0	21,1	27467,94	13,12	4,21
703,278	711,301	741,556	735,693	764,825	21,2	21,2	27396,67	13,76	4,13
701,244	705,835	735,517	729,570	758,093	21,4	21,4	27570,84	14,53	4,06
699,553	699,237	728,318	722,380	750,472	21,6	21,6	27630,21	15,28	3,96
703,886	703,049	732,137	726,368	754,621	21,2	21,4	27374,44	16,22	3,89
701,681	698,046	726,841	720,924	748,751	20,7	20,8	27535,98	16,70	3,83
702,261	698,374	727,025	721,061	748,693	20,2	20,3	27451,55	17,16	3,79
702,782	698,528	727,069	721,020	748,661	20,0	20,0	27416,78	17,56	3,78
702,970	697,960	726,062	720,061	747,288	20,2	20,2	27467,38	18,13	3,74
699,732	693,346	720,549	714,516	740,686	20,3	20,4	27667,91	18,87	3,70
702,610	696,396	723,711	717,690	744,005	20,6	20,6	27455,97	19,31	3,68
702,872	696,179	723,019	716,986	742,952	20,7	20,8	27450,40	19,83	3,65
703,165	695,475	721,460	715,302	740,589	20,9	21,0	27436,19	20,92	3,59
701,156	692,264	717,314	710,984	735,245	21,1	21,1	27569,05	21,72	3,55
702,997	693,885	718,411	712,064	735,873	21,3	21,3	27424,12	22,68	3,52
698,797	687,798	710,885	704,304	726,241	21,4	21,5	27743,34	23,66	3,45
702,581	692,159	715,199	708,723	730,752	21,6	21,7	27465,90	24,30	3,41

701,331	689,909	711,724	705,056	725,471	21,1	21,2	27559,73	25,39	3,33
702,675	690,971	711,568	704,775	724,030	20,6	20,7	27496,33	26,32	3,28

Tabela I.99 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,606	119,532	143,903	135,327	155,602	20,8	20,9	34237,51	0,00	4,61
100,522	113,788	134,921	125,439	142,524	20,4	20,4	34272,51	1,72	4,50
100,805	111,982	132,015	122,454	138,448	20,6	20,7	34217,42	2,08	4,45
98,578	93,707	111,332	101,207	114,888	21,0	21,0	34330,79	2,39	4,32
99,882	82,332	98,989	88,689	100,579	20,5	20,6	34281,35	2,59	3,99
101,766	78,800	94,217	83,767	94,433	19,9	19,9	34196,66	2,84	3,83
101,735	76,658	90,860	80,187	89,336	20,1	20,1	34182,99	3,02	3,76
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00

Tabela I.100 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_e = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_g$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
299,870	318,368	342,958	334,116	353,791	21,1	21,2	34210,11	0,00	4,68
299,965	316,287	339,590	330,606	348,951	20,1	20,2	34187,46	1,92	4,60
299,196	314,154	336,706	327,401	344,698	20,4	20,4	34262,00	2,56	4,54
299,157	313,277	335,389	326,049	343,015	20,8	20,9	34227,20	3,00	4,51
299,845	313,808	335,734	326,384	343,363	21,1	21,2	34204,51	3,14	4,50
298,941	312,361	333,901	324,367	340,689	20,3	20,4	34263,94	3,39	4,48
299,152	311,908	333,066	323,401	339,451	19,7	19,8	34253,32	3,78	4,46
299,575	311,063	331,554	321,740	337,048	20,0	20,0	34244,17	4,23	4,42
299,307	309,787	329,850	319,925	334,741	20,2	20,2	34234,25	4,56	4,39
300,718	310,812	330,701	320,823	335,396	20,3	20,4	34182,98	4,83	4,37
300,617	309,210	328,403	318,329	332,101	20,4	20,5	34184,62	5,35	4,32
300,922	305,653	324,355	314,335	327,670	20,6	20,6	34174,89	5,65	4,24
299,554	302,356	320,181	309,808	322,217	20,7	20,8	34224,15	6,13	4,18
302,228	293,368	310,216	299,833	311,730	20,9	21,0	34105,02	6,65	3,93
299,720	282,670	297,933	287,056	296,605	21,1	21,2	34220,22	7,37	3,67
299,763	275,665	289,880	278,903	287,165	20,6	20,8	34223,61	7,84	3,46
300,478	272,043	285,339	274,222	281,428	20,1	20,3	34213,35	8,35	3,29
301,181	270,903	282,871	271,486	277,114	19,9	19,9	34182,44	8,96	3,18
300,150	268,298	279,047	267,361	271,320	20,0	20,1	34230,50	9,36	3,09
300,331	267,369	276,949	265,030	267,365	20,2	20,3	34217,64	9,81	3,01
299,716	265,241	272,926	260,729	259,646	20,4	20,4	34226,12	10,37	2,88

Tabela I.101 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,789	520,494	544,738	535,901	554,780	20,6	20,7	34223,16	0,00	5,22
501,076	519,939	544,037	535,059	553,869	21,2	21,2	34215,48	0,93	5,18
500,221	517,492	540,998	531,995	550,063	20,1	20,2	34218,42	2,02	4,77
499,286	515,879	538,865	529,663	547,360	20,5	20,5	34257,41	2,61	4,74
500,103	516,583	539,605	530,452	547,985	20,7	20,7	34213,56	2,75	4,78
500,887	517,204	540,212	531,020	548,484	21,1	21,2	34160,18	2,98	4,76
499,510	515,328	537,930	528,563	545,765	21,0	21,2	34213,75	3,38	4,80
499,790	514,923	537,206	527,825	544,509	20,1	20,2	34253,41	3,83	4,75
499,341	513,632	535,319	525,765	541,924	20,2	20,3	34292,46	4,46	4,71
501,072	515,361	537,219	527,750	543,882	20,4	20,4	34210,49	4,70	4,72
501,604	515,564	537,237	527,630	543,664	20,6	20,6	34189,86	5,07	4,70
500,558	513,854	534,869	525,079	540,408	20,8	20,8	34232,91	5,65	4,71
500,148	512,298	532,653	522,740	537,499	21,1	21,1	34270,72	6,38	4,65
501,167	513,026	533,331	523,368	538,044	21,2	21,3	34207,34	6,80	4,56
500,167	510,752	530,300	520,170	533,959	21,2	21,3	34251,31	7,45	4,52
500,900	510,203	529,142	518,962	532,114	20,6	20,8	34225,58	8,35	4,48
501,632	509,268	527,467	517,021	529,203	20,2	20,3	34215,40	9,33	4,43
499,367	501,777	518,680	507,963	518,767	20,0	20,0	34353,25	10,23	4,36
501,078	503,160	520,086	509,337	520,309	20,1	20,2	34251,88	10,53	4,32
501,325	499,515	515,653	504,901	515,275	20,3	20,4	34240,81	10,99	4,22
503,167	498,905	514,906	504,210	514,505	20,5	20,5	34146,04	11,44	4,15
502,405	486,141	501,640	490,663	499,777	20,8	20,8	34184,25	12,03	3,89
501,713	484,612	499,313	488,177	496,582	21,0	21,0	34209,17	12,55	3,84
500,996	483,355	497,659	486,515	494,372	21,1	21,2	34239,45	12,75	3,80
501,028	478,636	492,462	481,164	488,384	21,3	21,4	34218,06	13,34	3,75
500,487	476,713	489,632	478,139	484,285	21,0	21,1	34276,37	13,89	3,69
501,130	471,685	484,213	472,612	478,158	20,6	20,7	34244,12	14,42	3,46
502,402	472,395	484,700	473,152	478,487	20,1	20,2	34189,61	14,82	3,40

Tabela I.102 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 34200 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
701,338	720,727	744,685	735,659	753,927	21,4	21,4	34246,47	0,00	4,96
700,919	719,088	742,401	733,223	750,759	21,7	21,7	34255,65	2,08	4,85
700,401	717,158	739,600	730,125	746,683	21,0	21,1	34281,72	3,86	4,77
699,595	715,879	738,338	728,968	745,421	20,2	20,3	34179,45	4,46	4,86
700,225	715,643	737,844	728,339	744,480	20,6	20,6	34162,22	5,43	4,84
700,327	715,067	736,917	727,349	743,171	21,1	21,1	34139,27	6,25	4,78
698,644	712,862	734,357	724,662	740,115	21,3	21,3	34204,19	6,64	4,75
699,616	713,523	734,843	725,050	740,302	21,2	21,4	34106,15	7,33	4,73
696,888	709,488	729,987	720,110	734,270	20,7	20,8	34245,53	8,20	4,71
698,510	710,879	731,234	721,296	735,477	20,4	20,5	34169,33	8,84	4,69

698,569	709,980	729,898	719,716	733,471	20,0	20,1	34217,74	9,50	4,66
698,119	708,813	728,213	718,015	731,161	20,3	20,3	34235,35	10,12	4,63
699,340	709,490	728,774	718,498	731,459	20,4	20,5	34173,89	10,89	4,60
698,240	707,457	726,099	715,720	728,096	20,6	20,7	34212,96	11,58	4,59
697,877	704,736	722,270	711,657	722,868	21,3	21,3	34172,92	13,46	4,54
697,381	702,777	719,615	708,844	719,214	21,1	21,2	34187,93	14,46	4,48
699,430	701,388	718,047	707,287	717,683	20,7	20,8	34082,99	15,12	4,41
701,926	697,089	712,910	701,944	711,203	20,2	20,4	34225,76	15,90	4,24
698,867	685,731	700,445	689,140	697,151	20,3	20,3	34326,83	16,72	4,04
702,053	685,109	699,666	688,477	696,216	20,5	20,5	34190,99	17,67	3,92
697,726	678,384	691,232	679,540	685,283	20,7	20,7	34405,82	19,03	3,79
702,812	683,588	696,495	684,937	690,943	20,9	20,9	34142,28	19,88	3,77
699,767	674,086	685,955	674,163	678,671	21,1	21,2	34289,62	20,68	3,57
702,151	672,560	683,945	672,106	675,998	21,3	21,3	34179,28	21,78	3,43
698,347	664,902	674,338	661,933	663,506	21,4	21,5	34347,60	23,09	3,26

Tabela I.103 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,852	158,823	233,510	225,304	297,719	20,2	20,3	25494,52	0,00	7,57
98,824	155,732	227,975	219,803	290,578	20,7	20,8	25535,10	1,43	7,44
100,413	155,647	227,095	218,921	289,101	21,0	21,0	25475,90	1,95	7,35
101,334	144,343	214,121	205,909	275,352	20,3	20,4	25403,05	2,49	7,11
100,260	138,043	206,657	198,485	267,201	20,0	20,1	25483,74	2,95	6,97
99,689	128,132	194,866	187,061	255,051	20,3	20,3	25521,55	3,36	6,71
100,626	122,424	187,230	179,571	247,076	20,4	20,5	25446,86	3,81	6,47
101,687	119,099	182,219	174,652	241,405	20,5	20,6	25402,33	4,27	6,26
101,234	115,184	176,559	169,014	234,437	20,6	20,7	25445,16	4,72	6,12
101,254	111,975	171,366	163,754	227,053	20,8	20,8	25445,63	5,26	5,94
100,746	110,117	167,540	159,934	221,652	20,9	20,9	25460,37	5,57	5,85
100,302	107,928	160,173	152,760	211,976	20,9	21,0	25497,45	5,94	5,67
101,096	107,644	140,603	134,149	188,768	20,2	20,3	25439,18	6,49	5,15
99,567	104,778	119,777	112,518	126,458	19,8	19,9	25561,26	6,96	3,36
100,711	105,424	118,933	111,633	123,732	20,0	20,1	25495,42	7,19	3,23
100,311	104,104	114,940	107,593	116,658	20,1	20,2	25516,50	7,55	3,05
100,656	103,552	112,436	105,142	112,025	20,2	20,3	25485,14	7,96	2,91
102,065	104,227	111,405	104,122	109,081	20,3	20,4	25396,97	8,53	2,76
99,732	100,318	104,876	97,854	99,975	20,4	20,5	25561,09	9,01	2,66
100,425	100,859	105,111	98,117	99,837	20,5	20,6	25509,69	9,23	2,64
100,582	100,645	104,148	96,957	97,586	20,6	20,6	25497,96	9,60	2,58
101,507	101,343	104,450	97,209	97,250	20,7	20,7	25433,32	9,97	2,55
101,290	99,735	101,058	93,415	90,643	20,8	20,9	25458,47	10,91	2,46



Tabela I.104 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
301,882	360,593	435,193	426,919	498,994	20,3	20,4	25502,62	0,00	7,57
301,458	359,714	433,409	425,277	496,632	21,0	21,0	25522,67	1,12	7,49
301,183	358,697	431,374	423,209	493,760	21,2	21,3	25549,01	2,00	7,44
300,407	357,276	429,463	421,260	491,454	20,2	20,4	25610,83	2,41	7,42
301,420	358,137	429,978	421,790	491,783	20,1	20,2	25530,06	2,77	7,40
301,902	358,245	429,759	421,432	491,090	20,4	20,4	25512,99	3,19	7,38
300,440	356,279	427,310	419,038	488,184	20,6	20,6	25595,54	3,54	7,34
302,467	357,722	428,475	420,147	489,101	20,8	20,9	25472,01	4,04	7,30
301,359	353,605	423,660	415,332	483,744	21,0	21,1	25554,95	4,49	7,25
302,089	352,966	422,724	414,582	482,901	19,9	20,0	25517,53	4,79	7,22
302,365	348,152	417,266	409,072	477,162	20,1	20,2	25477,55	5,10	7,10
301,390	345,593	414,230	405,909	473,586	20,3	20,3	25555,12	5,51	7,06
301,261	339,853	407,629	399,413	466,681	20,4	20,5	25563,23	5,96	6,94
300,417	340,143	407,556	399,444	466,334	20,6	20,7	25624,82	6,19	6,95
299,535	334,273	400,898	392,843	459,307	20,8	20,9	25667,85	6,66	6,83
301,382	335,299	401,569	393,468	459,712	21,0	21,1	25561,56	7,24	6,79
298,290	328,009	392,836	384,862	450,162	21,1	21,2	25764,16	7,84	6,67
301,667	331,494	396,118	388,194	453,743	20,4	20,6	25554,43	8,25	6,64
301,291	326,336	389,671	381,839	446,664	20,3	20,3	25569,04	8,80	6,47
301,790	325,398	388,084	380,347	444,570	20,4	20,5	25538,22	9,15	6,39
302,351	322,878	384,567	376,697	439,690	20,6	20,7	25493,12	9,80	6,25
300,853	318,765	378,927	371,213	432,132	20,9	21,0	25578,58	10,51	6,09
299,331	316,212	375,708	367,844	427,306	21,1	21,2	25687,96	10,94	6,04
301,409	316,515	375,369	367,517	425,981	21,0	21,2	25570,11	11,38	5,94
301,841	316,122	374,203	366,313	423,419	19,9	20,0	25479,73	11,94	5,89
301,357	313,920	370,169	362,278	417,867	20,4	20,4	25563,04	12,45	5,76
301,269	312,222	363,878	356,197	409,477	20,6	20,6	25559,67	13,30	5,58
301,966	311,842	360,416	352,904	404,757	20,7	20,8	25514,08	13,95	5,46
301,215	309,789	350,446	343,478	393,610	21,1	21,1	25563,08	14,82	5,26
301,488	309,676	345,256	338,443	387,601	21,1	21,2	25542,04	15,29	5,11
302,270	309,417	337,049	329,989	368,646	20,4	20,6	25496,16	16,10	4,63
303,061	309,938	332,962	325,798	352,849	20,0	20,0	25433,94	16,53	4,12
303,142	309,543	328,112	320,679	337,240	20,3	20,3	25428,49	17,02	3,59
302,371	307,876	322,789	315,167	326,394	20,4	20,5	25500,13	17,60	3,29
301,769	306,521	318,914	311,085	319,775	20,7	20,7	25544,81	18,16	3,12
303,122	305,519	313,034	306,092	310,674	20,9	20,9	25446,17	19,80	2,81
301,948	303,262	308,799	301,483	303,402	20,5	20,6	25533,89	21,23	2,66
301,655	301,745	305,717	298,117	297,763	19,8	19,9	25562,12	22,67	2,56
300,973	300,572	303,877	296,082	294,880	20,1	20,2	25613,87	23,18	2,54
299,901	298,128	299,346	291,020	286,916	20,3	20,4	25718,68	25,03	2,38



Tabela I.105 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,082	559,382	633,924	625,729	697,575	20,5	20,6	25471,25	0,00	7,84
498,926	557,126	630,035	621,810	692,336	20,7	20,8	25537,65	2,13	7,79
499,693	557,690	629,924	621,762	691,939	21,0	21,0	25511,40	2,96	7,72
500,405	557,896	629,966	621,921	691,900	20,9	21,0	25450,66	3,41	7,65
497,591	554,695	625,941	617,785	687,143	20,2	20,2	25679,25	3,92	7,63
501,496	558,543	629,911	621,761	691,182	20,5	20,5	25412,44	4,63	7,60
500,167	556,743	627,556	619,427	688,351	20,7	20,8	25505,36	5,22	7,56
500,560	557,165	627,680	619,547	688,323	20,9	20,9	25462,03	5,56	7,54
497,479	553,164	622,940	614,813	682,897	21,0	21,1	25665,96	6,06	7,52
499,273	554,996	624,865	616,709	684,743	20,9	21,1	25555,49	6,41	7,49
500,763	555,114	624,701	616,518	684,445	20,4	20,6	25451,67	7,07	7,45
500,017	550,063	618,870	610,758	678,206	20,0	20,1	25522,84	7,70	7,36
500,013	546,900	615,247	607,052	674,306	20,0	20,1	25524,34	8,14	7,28
500,704	546,296	614,202	606,139	673,015	20,1	20,2	25463,00	8,92	7,25
499,751	541,635	608,684	600,600	667,026	20,3	20,4	25551,24	9,44	7,15
499,878	541,715	608,527	600,437	666,646	20,5	20,5	25537,77	9,99	7,17
499,731	536,955	603,043	594,962	660,730	20,6	20,7	25533,57	10,55	7,03
500,717	537,162	602,749	594,675	660,337	20,7	20,8	25466,36	11,28	7,00
500,000	533,567	598,529	590,556	655,836	20,9	20,9	25513,03	11,74	6,94
500,406	534,618	599,360	591,345	656,432	21,1	21,1	25495,44	12,28	6,95
499,942	531,995	596,094	588,168	652,773	21,2	21,3	25509,01	12,82	6,86
499,548	530,777	594,201	586,402	650,424	20,7	20,9	25572,64	13,41	6,83
500,614	527,715	590,631	582,818	646,478	20,3	20,5	25484,63	13,89	6,67
500,755	526,364	588,407	580,567	643,299	21,0	21,2	25416,35	14,62	6,58
499,228	525,036	586,760	578,870	640,687	20,4	20,5	25604,75	15,09	6,57
499,981	523,620	584,596	576,781	637,912	20,1	20,2	25537,57	15,56	6,47
500,174	521,722	581,832	573,947	633,490	20,3	20,4	25505,26	16,43	6,34
500,672	522,037	581,914	573,938	632,787	20,5	20,6	25487,73	16,79	6,32
498,531	518,549	577,831	569,905	627,644	20,9	20,9	25634,51	17,12	6,24
500,583	519,731	578,808	570,865	628,168	21,0	21,1	25491,80	17,46	6,20
501,114	520,263	579,116	571,207	627,864	21,2	21,2	25444,19	17,83	6,16
499,380	516,426	574,095	566,265	621,103	20,5	20,7	25608,74	18,66	6,09
500,564	516,921	573,737	565,765	619,230	19,9	20,1	25493,35	19,50	6,01
500,183	515,590	571,366	563,541	616,128	19,9	20,0	25542,20	19,90	5,93
501,128	515,822	570,742	562,779	614,473	20,1	20,2	25465,73	20,42	5,89
499,425	512,557	563,557	555,791	605,876	20,3	20,4	25577,43	21,52	5,76
500,416	512,921	563,111	555,343	604,491	20,5	20,6	25517,52	22,04	5,69
500,125	512,123	560,461	552,780	601,408	20,9	21,0	25533,06	22,55	5,70
498,964	509,657	555,535	548,008	595,502	21,1	21,2	25610,78	23,48	5,54
500,206	510,475	554,620	547,228	593,807	20,9	21,0	25518,29	24,16	5,49
499,793	509,796	553,091	545,747	592,274	20,2	20,3	25564,80	24,43	5,46
501,488	510,926	551,094	543,837	589,506	20,2	20,3	25435,78	25,38	5,35
500,412	509,095	545,098	538,021	583,527	20,4	20,5	25516,79	25,93	5,25
502,128	510,559	543,752	536,794	580,302	20,6	20,7	25398,78	26,71	5,12
501,005	508,338	535,590	528,405	562,363	20,8	20,9	25466,19	27,71	4,70
501,533	508,178	530,984	523,534	547,010	21,1	21,2	25423,91	28,75	4,22

501,538	507,970	528,896	521,362	540,381	20,5	20,7	25454,79	29,05	3,99
500,744	506,386	523,525	515,629	529,142	20,1	20,2	25497,55	29,89	3,65
502,097	507,289	522,253	514,399	525,245	19,9	20,0	25396,44	31,00	3,48
500,489	503,205	511,745	504,483	509,553	20,2	20,3	25522,26	32,48	3,08
499,829	501,490	508,339	500,835	503,959	20,5	20,5	25622,31	33,81	3,00
500,756	502,253	508,802	501,341	503,935	20,7	20,7	25535,36	34,74	2,97
499,489	500,201	505,275	497,568	498,402	20,8	20,9	25623,86	36,06	2,88
500,235	500,852	505,697	497,950	498,158	21,0	21,1	25557,02	36,94	2,87
500,645	501,072	505,796	498,107	498,210	21,1	21,2	25552,41	37,15	2,83
500,667	500,746	504,804	496,943	496,172	20,4	20,6	25532,05	38,29	2,82
501,779	501,705	505,497	497,562	496,296	20,3	20,3	25476,81	39,20	2,76

Tabela I.106 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 25500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
701,888	761,237	835,222	827,063	898,287	21,3	21,3	25474,46	0,00	7,79
701,715	760,173	833,202	825,000	895,466	20,0	20,2	25549,55	1,62	7,68
701,524	758,851	830,382	822,225	891,345	20,2	20,2	25559,19	4,44	7,58
701,559	758,648	829,561	821,468	890,207	20,5	20,5	25578,99	5,36	7,67
702,658	759,503	830,199	822,026	890,588	20,7	20,7	25518,24	6,02	7,54
698,786	755,081	825,032	816,869	884,674	21,0	21,1	25737,11	6,52	7,42
702,246	758,635	828,752	820,503	888,542	21,2	21,2	25548,31	7,14	7,39
700,707	756,755	826,290	818,154	885,637	21,3	21,4	25661,10	7,55	7,36
701,815	757,797	827,212	819,058	886,460	21,0	21,2	25599,32	8,12	7,34
702,297	758,097	827,491	819,245	886,639	20,7	20,9	25538,75	8,53	7,34
700,570	755,511	824,296	816,115	882,872	20,3	20,5	25646,82	9,35	7,31
701,168	755,577	824,176	815,906	882,505	20,1	20,2	25625,15	9,89	7,30
701,979	753,780	822,142	813,855	880,466	20,3	20,4	25560,81	10,41	7,24
700,844	751,332	819,119	810,919	876,976	20,5	20,5	25635,42	10,89	7,20
700,871	751,589	819,241	810,905	876,823	20,7	20,7	25628,36	11,42	7,24
701,772	749,545	816,859	808,651	874,488	20,8	20,9	25541,43	12,18	7,14
701,793	746,473	813,192	804,983	870,538	21,2	21,2	25577,47	12,74	7,06
700,833	743,153	809,370	801,259	866,534	21,2	21,4	25632,21	13,29	7,01
701,536	743,084	809,079	800,953	866,009	20,8	21,0	25556,73	13,96	6,96
700,836	739,180	804,401	796,298	860,790	20,2	20,4	25669,54	14,93	6,91
701,179	738,597	803,529	795,404	859,708	20,1	20,2	25623,37	15,60	6,88
701,191	736,810	800,898	792,900	856,799	20,3	20,4	25635,84	16,72	6,80
702,197	735,301	798,793	790,751	854,242	20,5	20,5	25560,60	17,54	6,71
701,433	734,441	797,367	789,391	852,115	20,6	20,7	25587,47	18,58	6,71
702,416	733,768	796,261	788,284	850,813	20,8	20,8	25526,61	19,11	6,63
700,444	728,877	790,581	782,613	844,060	21,0	21,0	25693,78	19,95	6,55
701,166	729,178	790,433	782,399	843,237	21,2	21,3	25635,82	20,72	6,51
701,892	729,135	790,103	782,105	842,369	20,7	20,8	25599,14	21,26	6,46
702,551	727,782	788,102	780,089	839,464	20,3	20,4	25560,29	21,99	6,36
703,167	727,209	786,924	778,860	837,180	20,5	20,6	25504,14	22,80	6,27
702,194	724,225	783,039	775,059	831,548	20,9	20,9	25581,32	23,86	6,17
700,027	719,935	777,797	769,827	824,110	21,1	21,2	25740,44	25,10	6,07
701,484	720,235	777,078	769,124	821,676	21,1	21,2	25645,07	26,40	5,96

Tabela I.107 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
101,336	150,172	210,562	203,259	260,603	20,3	20,3	34028,13	0,00	7,61
100,911	147,135	205,672	198,581	254,330	20,7	20,8	34064,25	1,24	7,49
101,162	145,413	202,611	195,320	250,006	21,1	21,1	34052,10	2,01	7,40
101,384	144,671	201,579	194,182	248,583	21,0	21,1	34035,62	2,20	7,37
101,756	144,020	200,675	193,122	247,311	19,9	20,0	34022,52	2,42	7,36
101,499	116,908	172,828	165,393	218,492	20,3	20,4	34028,04	2,81	6,87
101,483	112,927	168,278	160,709	213,324	20,5	20,6	34032,51	2,98	6,73
102,047	106,782	156,925	150,370	202,686	20,9	20,9	34003,26	3,26	6,49
101,700	101,762	150,832	144,199	195,655	21,0	21,1	34005,69	3,54	6,32
101,080	96,449	144,206	137,667	188,464	20,1	20,1	34053,25	3,76	6,16
101,241	92,665	138,370	131,475	181,265	20,3	20,4	34056,13	4,25	5,97
101,021	89,471	132,842	125,752	174,456	20,5	20,6	34079,51	4,69	5,82
106,860	95,904	100,869	88,310	86,616	20,8	20,9	33740,68	4,99	3,93
106,534	93,118	87,510	72,956	57,028	21,0	21,1	33782,34	5,50	2,98

Tabela I.108 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
299,138	348,023	408,217	401,249	457,837	20,0	20,1	34036,39	0,00	7,97
301,968	349,322	408,260	401,109	456,903	21,2	21,2	34042,48	1,57	7,89
299,495	346,593	405,319	398,165	453,667	20,8	20,9	34025,81	1,90	7,86
300,228	346,438	404,802	397,521	452,694	20,5	20,6	34029,24	2,47	7,82
300,005	346,202	404,178	396,896	451,813	21,1	21,2	33999,23	2,76	7,82
299,760	345,368	402,967	395,591	450,148	21,3	21,4	34006,83	3,21	7,78
300,017	344,931	402,179	394,640	448,928	20,6	20,7	34006,15	3,73	7,76
299,571	343,689	400,485	392,949	446,726	20,2	20,3	34018,06	4,21	7,73
300,723	344,365	400,811	393,218	446,638	20,6	20,6	33980,71	4,73	7,68
299,352	341,635	397,324	389,543	442,297	20,9	21,0	34040,96	5,33	7,64
298,677	337,681	392,818	384,949	437,077	21,2	21,3	34075,29	5,85	7,58
301,300	331,095	386,344	378,548	430,560	20,6	20,7	33937,56	6,28	7,42
301,260	326,119	381,093	373,427	425,043	20,1	20,3	33964,78	6,59	7,29
299,610	313,475	363,608	356,932	407,799	20,3	20,4	34026,96	7,05	6,93
299,934	308,246	358,354	351,560	402,124	20,5	20,6	34020,48	7,28	6,80
300,204	304,969	354,424	347,713	397,721	21,2	21,2	33974,20	7,73	7,19
300,833	303,382	351,862	345,234	394,662	21,1	21,3	33958,24	8,28	7,09
299,924	296,949	344,672	337,994	386,830	20,3	20,5	34013,99	8,73	6,30
299,578	295,142	342,246	335,546	383,936	20,2	20,3	34046,40	9,04	6,22
299,322	293,237	339,632	332,767	380,654	20,4	20,4	34053,88	9,52	6,14
299,074	291,958	337,627	330,882	378,199	20,8	20,8	34051,21	9,86	6,09
299,575	290,709	335,362	328,488	375,189	21,0	21,0	34000,86	10,49	6,00
300,373	291,343	335,883	328,977	375,654	21,1	21,2	33990,31	10,62	5,98
299,932	288,791	331,506	324,420	369,999	21,1	21,2	33996,68	11,42	5,88

299,824	287,173	328,221	321,050	365,627	20,7	20,8	34002,16	12,07	5,79
301,099	287,507	325,541	318,178	362,102	20,2	20,3	33973,18	12,54	5,70
300,571	285,414	281,314	266,656	256,683	20,6	20,7	34005,26	13,34	3,33

Tabela I.109 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
499,768	549,164	608,998	601,985	658,333	20,3	20,5	34017,33	0,00	7,98
500,029	548,533	607,712	600,579	656,270	20,9	20,9	34043,33	1,42	7,93
499,038	547,321	605,985	598,773	654,208	21,1	21,2	34086,35	1,90	7,90
500,567	548,489	606,960	599,808	654,978	21,0	21,2	34012,24	2,58	7,92
499,448	546,398	604,410	597,146	651,953	20,6	20,7	34060,33	3,20	7,90
501,765	548,602	606,568	599,244	654,163	20,1	20,2	33966,98	3,68	7,86
500,891	547,063	604,533	597,126	651,505	20,1	20,1	34019,60	4,42	7,84
501,105	547,009	604,176	596,707	650,740	20,5	20,6	34008,91	5,05	7,82
502,311	547,534	604,329	596,808	650,708	20,8	20,8	33907,10	5,75	7,82
500,368	544,987	601,030	593,377	646,459	21,0	21,1	34028,53	6,73	7,74
499,260	542,762	598,091	590,306	642,685	21,3	21,3	34060,75	7,79	7,70
501,358	543,983	599,062	591,253	643,332	20,8	20,9	33957,10	8,61	7,66
500,844	542,164	596,756	588,837	640,463	20,2	20,4	34032,88	9,31	7,63
502,232	537,041	591,392	583,506	634,599	20,2	20,3	33935,46	10,22	7,52
500,664	530,759	584,736	576,775	627,182	20,4	20,4	34033,55	10,78	7,41
501,481	521,321	572,323	565,061	614,954	20,6	20,7	33979,50	11,55	7,09
500,214	515,867	564,814	557,899	607,224	20,8	20,9	34039,80	12,03	6,94
501,013	508,788	557,347	550,524	599,399	21,1	21,1	34004,48	12,65	6,76
499,130	501,646	549,191	542,306	590,154	21,0	21,1	34096,79	13,62	6,57
501,465	499,392	546,319	539,374	586,936	20,4	20,5	33992,60	14,60	6,41
499,750	496,310	542,900	535,976	583,132	20,3	20,3	34029,39	14,88	6,36
501,088	497,502	544,106	537,121	584,285	20,5	20,6	33960,83	15,09	6,35
500,903	496,246	542,213	535,411	582,135	20,7	20,8	33992,26	15,48	6,30
501,708	495,422	540,703	533,793	579,987	20,9	20,9	33951,46	16,41	6,21
499,106	491,121	535,339	528,245	573,560	21,0	21,1	34069,75	17,09	6,13
500,547	491,803	535,678	528,591	573,639	20,5	20,7	34004,83	17,66	6,10
500,064	490,343	533,614	526,473	571,010	20,0	20,1	34067,07	18,13	6,05
500,344	489,921	532,636	525,447	569,726	20,2	20,3	33994,55	18,69	5,99
500,021	487,681	528,657	521,327	564,210	20,4	20,5	34049,83	19,82	5,89
500,200	486,875	526,653	519,111	561,111	20,7	20,8	34036,12	20,58	5,91
500,006	486,102	524,930	517,411	558,674	20,9	20,9	34044,32	21,11	5,83
499,949	485,540	523,637	516,117	556,784	21,0	21,1	34021,11	21,51	5,77
499,652	484,654	521,746	514,028	553,959	21,3	21,4	34026,48	21,98	5,70
509,237	496,510	503,813	491,781	532,951	20,9	21,0	33514,63	22,16	4,98
497,992	481,480	477,937	463,220	453,458	20,2	20,3	34151,27	22,91	3,49

Tabela I.110 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 34000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
700,670	749,704	808,912	801,745	857,319	20,5	20,6	34127,52	0,00	7,89
703,341	751,656	810,531	803,320	858,568	20,3	20,4	34046,43	1,58	7,87
703,356	750,230	807,984	800,435	854,612	20,8	20,8	34058,14	4,40	7,77
702,763	748,659	805,883	798,204	851,814	21,2	21,2	34067,40	5,51	7,73
702,783	748,659	805,573	798,010	851,395	20,8	20,9	34104,12	5,99	7,73
703,893	749,252	805,974	798,285	851,713	20,2	20,3	34048,93	6,63	7,69
701,708	746,867	803,159	795,429	848,334	20,5	20,5	34144,86	7,14	7,68
703,252	748,372	804,464	796,706	849,500	21,2	21,2	34058,21	7,75	7,64
703,451	748,007	803,943	796,200	848,715	21,4	21,5	34026,11	8,40	7,65
698,735	742,217	797,304	789,309	840,913	21,0	21,1	34320,71	9,25	7,60
702,459	746,485	801,924	793,966	846,092	20,5	20,6	34090,45	9,67	7,61
702,806	745,659	800,430	792,282	843,661	20,3	20,3	34048,19	11,35	7,54
701,511	743,524	797,783	789,462	840,254	20,6	20,6	34135,83	12,11	7,54
702,416	743,695	797,782	789,497	840,155	20,8	20,9	34067,07	12,72	7,51
703,506	744,316	798,194	790,007	840,435	21,0	21,1	34008,58	13,36	7,49
700,077	737,447	790,493	782,158	831,662	21,3	21,3	34172,83	14,37	7,40
702,302	735,563	788,557	780,313	829,675	21,1	21,2	34055,11	15,23	7,31
702,031	725,487	778,147	769,974	818,644	20,4	20,5	34096,35	16,12	7,11
703,565	725,344	776,675	768,728	817,221	20,3	20,4	34040,70	16,70	7,04
700,711	717,756	765,603	758,331	805,606	20,6	20,6	34178,07	17,88	6,88
703,216	716,836	764,685	757,579	805,051	20,8	20,9	34061,89	18,35	6,81
700,782	704,401	751,082	743,989	790,523	21,1	21,1	34166,19	19,22	6,57
701,970	703,737	750,283	743,328	789,603	21,3	21,4	34068,63	20,02	6,48
702,001	702,304	748,423	741,300	787,323	21,0	21,1	34076,95	20,64	6,43
702,101	698,441	744,143	736,947	782,627	20,6	20,7	34074,96	21,43	6,32
702,994	698,844	744,294	737,221	782,713	20,2	20,3	34056,77	21,91	6,28
700,021	693,341	737,789	730,554	774,961	20,1	20,2	34240,25	22,89	6,20
703,620	697,459	742,041	734,852	779,490	20,4	20,5	34066,88	23,32	6,18
702,449	695,023	738,936	731,672	775,698	20,8	20,8	34107,68	24,03	6,12
701,022	691,329	734,052	726,545	769,617	21,0	21,0	34176,91	25,33	6,04
701,824	691,832	734,163	726,669	769,482	21,3	21,3	34150,98	25,92	5,99
703,653	692,977	734,626	727,200	769,560	21,3	21,4	34028,02	26,94	5,95

Tabela I.111 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,353	131,561	171,141	159,778	193,259	20,8	20,9	42521,82	0,00	7,50
99,998	127,928	165,587	153,649	185,745	20,4	20,4	42562,42	1,17	7,42
101,510	126,236	160,286	147,918	177,254	20,6	20,8	42443,15	2,09	7,32
100,896	123,931	158,003	145,441	174,179	20,1	20,2	42485,76	2,18	7,31
101,541	120,339	153,169	140,224	167,777	20,1	20,1	42456,02	2,51	7,20
104,594	101,985	131,214	118,096	143,548	20,3	20,4	42325,05	2,86	6,83

107,158	79,002	104,169	90,382	111,701	20,7	20,8	42207,92	3,11	6,18
107,190	74,940	97,103	82,685	100,611	20,9	21,0	42219,60	3,34	5,97
105,951	70,249	88,465	73,427	85,757	21,1	21,2	42280,85	3,54	5,79
110,345	73,142	89,649	74,523	78,633	20,7	20,9	42078,52	3,89	5,65

Tabela I.112 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
298,606	329,910	369,290	357,947	391,097	21,3	21,3	42494,61	0,00	8,25
298,215	328,368	366,923	355,329	387,492	19,9	20,0	42574,49	1,17	7,90
300,005	327,485	364,381	352,471	383,096	20,4	20,5	42516,14	2,71	7,59
300,173	327,215	363,715	351,738	382,067	21,0	21,1	42480,75	2,98	7,55
299,226	324,813	360,223	348,042	377,252	21,3	21,4	42517,10	3,63	7,48
298,480	323,222	358,297	345,956	374,705	20,8	21,0	42553,67	3,91	7,46
299,230	322,980	357,363	344,859	372,906	20,5	20,6	42539,83	4,40	7,44
299,034	322,028	355,880	343,215	370,886	20,8	20,8	42538,85	4,75	7,40
300,623	323,348	356,916	344,203	371,649	21,1	21,2	42484,26	5,05	7,39
300,509	322,180	354,986	342,230	369,099	21,3	21,4	42470,28	5,50	7,35
298,770	321,127	353,231	340,299	366,301	21,3	21,4	42506,24	5,79	7,35
301,209	320,121	352,440	339,183	364,740	20,8	20,9	42447,55	6,21	7,28
301,084	318,669	350,258	336,992	362,122	20,3	20,5	42440,50	6,60	7,23
301,775	315,785	345,846	332,463	356,523	20,2	20,3	42419,59	7,25	7,16
300,769	310,157	338,891	325,128	347,920	20,5	20,5	42462,39	7,68	7,04
303,765	281,310	308,600	294,754	315,335	20,9	21,0	42358,67	8,20	6,48
301,016	273,706	299,206	284,833	303,302	21,2	21,3	42422,19	8,66	6,13
300,317	271,310	295,500	280,932	298,089	21,2	21,4	42474,80	9,00	6,11
301,972	268,630	292,202	277,575	293,785	20,8	20,9	42391,90	9,43	5,91
300,712	259,892	280,806	265,520	278,518	20,3	20,4	42455,31	10,10	5,63
301,709	259,208	278,718	263,364	274,694	20,0	20,1	42421,08	10,56	5,50
299,494	252,518	267,632	251,452	255,655	20,3	20,4	42547,21	11,42	5,23
302,482	254,761	268,682	252,389	254,660	20,5	20,5	42388,91	11,95	5,40

Tabela I.113 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,547	532,727	571,895	560,392	592,698	20,2	20,3	42467,59	0,00	7,63
501,420	531,020	569,128	557,361	588,529	20,6	20,6	42483,62	1,94	7,57
499,933	528,891	566,601	554,722	585,630	20,9	21,0	42517,34	2,41	7,55
500,865	529,146	566,357	554,331	584,697	21,4	21,4	42480,40	3,21	7,52
498,663	526,127	562,748	550,583	580,262	20,5	20,5	42634,32	3,48	7,51
502,323	529,817	566,349	554,249	583,857	20,9	21,0	42500,72	4,02	7,49
500,864	527,594	563,638	551,332	580,530	21,3	21,3	42526,86	4,56	7,46
500,655	526,850	562,659	550,169	578,996	21,0	21,1	42525,47	4,93	7,45
501,737	527,775	563,368	550,974	579,522	20,6	20,7	42478,74	5,40	7,43

500,283	525,362	560,305	547,708	575,621	20,1	20,2	42578,17	5,89	7,42
502,450	527,133	561,808	549,257	577,010	20,2	20,3	42480,54	6,46	7,38
499,842	523,428	557,463	544,532	571,317	20,5	20,5	42569,82	6,93	7,34
500,467	523,353	556,843	543,912	570,352	20,7	20,8	42557,91	7,48	7,32
501,681	524,167	557,523	544,454	570,796	20,9	21,0	42506,34	7,91	7,30
501,032	522,198	554,705	541,506	566,904	21,1	21,2	42503,08	8,75	7,29
499,363	519,432	551,108	537,637	562,351	21,2	21,3	42581,48	9,29	7,22
498,694	517,484	548,456	534,799	558,574	20,7	20,8	42604,06	9,99	7,17
501,518	519,579	550,319	536,653	560,176	20,3	20,4	42533,94	10,59	7,13
500,879	517,412	547,212	533,280	555,961	20,3	20,3	42553,94	11,36	7,08
501,427	519,159	548,084	534,186	556,357	20,7	20,7	42541,66	11,89	7,09
500,415	511,218	539,968	525,793	546,541	21,1	21,2	42550,54	12,51	7,00
501,113	509,983	538,791	524,684	545,587	21,4	21,4	42447,49	12,65	6,94
500,394	508,100	535,789	521,398	541,680	21,1	21,2	42510,30	13,17	6,87
501,017	508,521	535,400	520,969	540,795	20,5	20,7	42476,34	13,76	6,84
498,718	481,717	506,551	491,559	508,548	20,3	20,4	42598,12	14,68	6,29
501,835	480,076	505,093	490,259	507,175	20,6	20,7	42456,07	15,04	6,20
502,087	479,565	504,584	489,790	506,756	20,8	20,8	42443,84	15,03	6,17
502,414	478,381	502,425	487,401	503,320	21,4	21,5	42419,72	15,84	6,06
499,151	466,014	487,974	472,375	485,435	20,6	20,7	42553,34	16,86	5,78
500,389	466,918	488,486	473,045	485,760	20,0	20,1	42524,60	17,15	5,74
501,000	459,386	480,185	464,605	476,162	20,3	20,4	42494,64	17,69	5,49
501,123	457,356	477,176	461,418	471,885	20,6	20,7	42483,85	18,26	5,38
501,488	453,772	470,501	454,103	460,870	20,9	21,0	42503,13	19,85	5,14
501,807	453,005	468,556	451,948	456,933	21,2	21,3	42484,12	20,44	5,06

Tabela I.114 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 42500 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
699,497	729,958	768,515	756,717	787,843	21,1	21,2	42569,21	0,00	7,64
700,860	730,937	769,376	757,554	788,574	20,8	20,9	42470,99	1,52	7,62
700,930	728,847	765,730	753,530	783,063	20,4	20,5	42509,78	4,33	7,54
698,309	724,904	760,967	748,508	776,903	20,2	20,2	42620,65	5,29	7,49
701,843	728,512	764,631	752,261	780,825	20,4	20,5	42485,38	5,94	7,48
701,338	727,632	763,248	750,689	778,753	20,9	20,9	42499,50	6,62	7,44
699,639	724,808	759,666	746,876	774,193	21,1	21,1	42579,79	7,43	7,40
701,252	726,092	760,652	747,770	774,796	21,3	21,4	42504,19	8,33	7,37
700,750	725,380	758,980	746,028	772,275	21,3	21,4	42536,00	9,42	7,34
699,211	724,033	756,732	743,572	768,648	21,0	21,1	42582,57	10,59	7,31
698,694	720,052	752,260	738,744	762,744	20,6	20,8	42612,84	11,80	7,23
699,447	719,221	750,838	737,127	760,472	20,2	20,3	42597,74	12,93	7,20
701,027	720,455	751,675	738,046	761,409	20,4	20,5	42525,09	13,48	7,18
699,024	720,167	750,463	736,653	759,398	20,8	20,9	42601,46	13,97	7,19
700,415	718,955	749,703	735,934	758,460	21,2	21,2	42538,53	14,29	7,13
699,494	717,262	747,705	733,744	756,019	21,3	21,4	42560,13	14,52	7,09
700,487	717,141	746,871	732,786	754,208	20,2	20,3	42507,95	15,85	7,04
699,443	715,838	744,208	729,926	750,847	20,5	20,5	42542,83	16,63	7,01
701,108	717,432	745,232	731,054	751,442	20,7	20,8	42478,92	17,58	7,00



699,575	713,724	740,896	726,354	745,711	20,9	21,0	42547,63	18,27	6,94
700,642	712,261	739,454	724,830	743,577	21,1	21,2	42494,27	18,98	6,87
698,497	703,469	729,385	714,309	731,911	21,4	21,4	42565,93	19,96	6,76

Tabela I.115 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 30000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,420	179,954	280,665	270,834	369,448	21,3	21,5	30027,08	0,00	10,22
100,661	179,199	278,095	268,287	365,795	20,2	20,3	29971,27	1,27	10,15
98,936	176,554	274,481	264,677	361,397	20,4	20,5	30052,57	1,67	10,06
99,865	176,626	273,708	263,917	360,013	20,5	20,6	30019,02	2,13	9,98
99,413	174,878	271,268	261,346	356,840	20,9	21,0	30035,65	2,52	9,94
100,820	173,888	269,787	259,952	355,126	20,7	20,9	29967,15	2,79	9,89
101,679	164,031	258,668	248,957	343,572	20,1	20,1	29915,29	3,21	9,73
99,866	154,233	247,692	238,009	331,885	20,3	20,3	30017,06	3,48	9,55
98,718	148,546	241,057	231,419	324,602	20,5	20,6	30087,54	3,88	9,46
99,561	141,032	232,230	222,963	315,734	20,8	20,9	30039,78	4,12	9,20
102,018	135,261	224,613	215,522	308,094	21,0	21,1	29919,59	4,48	8,90
100,680	130,083	217,931	208,951	300,851	20,7	20,9	29977,77	4,78	8,72
101,274	122,243	207,322	198,472	289,369	20,0	20,1	29956,89	5,37	8,32
100,367	117,164	200,230	191,396	281,214	20,3	20,3	30002,10	5,80	8,23
100,076	114,408	196,011	187,209	276,205	20,5	20,6	30006,16	6,13	8,14
101,477	113,916	193,711	184,786	272,848	20,6	20,7	29930,24	6,55	8,03
100,895	111,455	188,839	179,911	266,536	20,8	20,9	29970,39	6,91	7,92
100,743	109,550	173,507	165,083	247,701	20,9	21,0	29971,19	7,37	7,64
102,343	110,908	166,559	158,802	239,963	20,7	20,9	29882,83	7,57	7,46
102,336	109,852	137,698	129,125	177,585	20,0	20,1	29906,95	7,99	5,88
101,118	107,567	127,925	118,874	142,594	20,2	20,3	29983,06	8,24	4,71
101,419	106,954	124,477	115,573	133,396	20,3	20,4	29941,74	8,48	4,38
100,137	104,296	116,028	108,114	119,303	20,5	20,6	30031,12	8,76	4,03
102,229	105,540	115,662	107,721	116,851	20,6	20,7	29915,77	9,29	3,88
100,543	102,698	110,208	101,862	107,500	20,8	20,8	29990,06	9,78	3,72
99,965	101,121	107,261	98,618	102,229	20,9	20,9	30020,58	10,11	3,62
101,337	101,908	107,404	98,472	100,950	21,0	21,0	29956,57	10,53	3,55
101,178	101,150	105,158	96,082	96,437	20,0	20,1	29980,17	11,01	3,47
100,915	100,272	103,614	94,284	93,278	20,1	20,2	29999,32	11,28	3,42
101,814	101,146	103,934	94,568	93,064	20,3	20,3	29938,05	11,57	3,44
101,721	100,399	102,159	92,754	89,620	20,4	20,5	29940,27	11,92	3,36

Tabela I.116 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 30000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
300,437	380,899	481,638	472,011	570,163	19,9	20,0	30044,29	0,00	10,46
300,494	380,101	479,724	470,112	567,649	20,3	20,4	30031,77	1,19	10,39



300,053	378,958	477,752	468,160	565,016	20,5	20,6	30075,72	1,85	10,35
299,813	378,260	476,607	467,024	563,522	20,8	20,9	30071,45	2,21	10,32
298,882	376,971	474,719	465,102	561,028	20,2	20,2	30124,47	2,63	10,32
300,851	378,938	476,671	466,939	563,062	20,4	20,5	30036,67	2,92	10,31
300,614	378,341	475,419	465,851	561,528	20,2	20,3	30049,76	3,27	10,21
297,482	374,631	471,038	461,405	556,379	20,5	20,5	30224,68	3,63	10,20
302,888	380,262	477,112	467,340	562,772	20,8	20,9	29916,00	3,89	10,21
301,462	378,305	474,459	464,719	559,533	21,2	21,3	29997,95	4,32	10,16
299,148	375,325	470,815	461,099	555,270	20,7	20,9	30127,65	4,72	10,13
297,677	372,876	467,528	457,775	551,353	20,3	20,5	30221,40	5,28	10,10
300,958	374,755	469,228	459,402	552,819	19,9	20,0	30056,59	5,91	10,05
300,968	369,667	463,550	453,789	546,884	20,1	20,2	30033,72	6,25	9,95
300,414	362,016	454,777	445,075	537,518	20,5	20,6	30067,05	6,81	9,79
300,890	358,038	450,044	440,289	532,260	20,7	20,8	30046,07	7,34	9,68
302,207	358,600	450,375	440,733	532,569	20,9	21,0	29956,56	7,70	9,69
301,811	349,580	440,052	430,436	521,515	21,0	21,2	29966,08	8,44	9,46
298,103	342,556	431,899	422,571	512,747	20,6	20,8	30185,13	8,94	9,38
302,802	345,215	434,210	424,829	515,214	20,0	20,1	29929,04	9,52	9,28
302,692	343,314	431,331	422,105	512,014	20,2	20,2	29939,03	10,05	9,20
301,529	339,075	425,887	416,783	506,135	20,4	20,4	30017,58	10,50	9,08
301,234	333,259	418,238	409,202	497,815	20,5	20,6	30013,74	11,09	8,85
299,824	329,754	413,753	404,776	492,522	20,7	20,8	30101,33	11,53	8,78
300,774	329,129	412,200	403,132	490,136	20,9	21,0	30048,83	12,13	8,70
300,306	325,610	407,679	398,662	484,753	21,0	21,1	30074,42	12,53	8,55
301,078	324,679	406,027	397,055	482,397	21,2	21,3	30016,76	12,99	8,46
301,421	322,568	402,529	393,430	476,810	20,9	21,0	30001,93	13,82	8,33
300,798	319,219	397,568	388,464	470,154	20,3	20,4	30042,54	14,48	8,20
302,066	318,230	394,246	385,199	464,703	20,1	20,2	30015,23	15,35	8,03
300,473	315,335	388,305	379,397	457,645	20,4	20,4	30092,61	15,66	7,93
300,830	314,724	386,943	377,950	455,350	20,5	20,6	30056,77	16,11	7,86
301,328	314,246	382,284	373,440	449,387	20,9	21,0	30064,82	16,71	7,76
300,310	312,077	376,144	367,542	442,221	21,1	21,1	30078,69	17,02	7,62
302,457	313,253	364,576	356,680	429,677	21,0	21,2	29953,73	17,93	7,29
302,461	312,113	349,237	340,834	407,227	20,2	20,3	29983,83	18,75	6,76
302,267	310,423	335,482	326,331	352,875	20,0	20,1	30009,78	19,63	5,19
298,792	302,908	313,982	305,368	314,387	20,3	20,4	30226,80	20,77	4,10
301,577	305,294	315,484	306,828	314,531	20,5	20,6	30050,23	21,76	4,00
302,127	305,210	313,848	305,034	310,891	20,7	20,8	29990,68	22,64	3,90
300,358	302,413	309,245	300,121	303,592	20,8	20,9	30136,54	23,47	3,77
301,460	302,822	308,577	299,305	301,318	21,0	21,0	30054,43	24,49	3,67
302,074	302,682	307,249	297,753	297,884	21,1	21,2	30008,80	25,64	3,59
294,052	291,583	291,336	280,658	274,050	20,7	20,9	30543,82	27,52	3,31

Tabela I.117 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,0.8.BEP} = 30000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,690	582,399	682,409	672,731	770,217	20,7	20,8	30139,09	0,00	10,66
500,517	579,895	678,390	668,746	764,970	20,5	20,5	30224,72	1,91	10,56

498,450	577,547	675,872	666,319	762,622	21,3	21,4	30046,30	2,47	10,50
498,381	576,999	674,594	665,161	760,852	20,7	20,9	30073,62	3,30	10,46
500,492	579,028	676,589	666,993	762,667	20,1	20,1	29954,60	3,84	10,44
501,207	579,517	676,541	666,952	762,205	20,8	20,9	29919,69	4,61	10,37
500,311	578,059	674,326	664,811	759,418	21,2	21,3	29973,21	5,34	10,34
496,989	574,140	669,469	659,929	753,674	21,0	21,1	30175,24	6,04	10,32
500,368	577,487	672,943	663,394	757,264	20,4	20,5	29991,54	6,52	10,28
499,015	575,547	670,264	660,563	753,897	20,8	20,8	30078,63	7,17	10,26
501,083	577,495	672,294	662,667	755,979	21,0	21,1	29927,56	7,54	10,22
498,401	573,810	667,742	658,164	750,597	20,1	20,3	30118,02	8,37	10,20
499,719	574,698	668,362	658,757	751,090	20,4	20,5	30024,44	8,83	10,18
498,519	572,460	665,428	655,868	747,567	20,7	20,8	30083,80	9,50	10,14
499,782	570,979	663,629	654,026	745,633	20,9	20,9	30005,31	10,06	10,07
500,845	569,199	661,478	651,809	743,053	21,2	21,3	29940,65	10,69	10,00
497,370	560,731	651,788	642,229	732,397	20,7	20,9	30156,79	11,55	9,91
499,768	557,289	647,830	638,209	728,390	20,1	20,2	30024,57	12,15	9,75
499,834	559,801	650,392	640,874	730,747	20,4	20,5	30020,28	12,61	9,82
499,256	551,846	641,248	631,756	721,036	20,7	20,8	30057,50	13,33	9,63
499,592	545,948	633,987	624,627	713,374	21,0	21,1	30015,36	14,53	9,47
500,748	547,267	635,064	625,660	714,027	21,0	21,1	29961,84	15,33	9,47
499,920	539,789	625,306	616,180	703,297	20,1	20,3	30048,63	16,86	9,23
498,870	535,913	620,351	611,240	697,826	20,5	20,6	30111,70	17,33	9,10
498,635	531,149	614,041	604,964	690,239	20,7	20,8	30116,51	18,43	8,91
500,334	531,185	613,533	604,546	689,362	21,1	21,1	30035,54	19,00	8,83
499,927	529,594	610,949	601,874	685,416	21,2	21,3	30034,91	19,78	8,75
498,744	525,460	605,773	596,775	678,537	20,4	20,6	30113,79	20,65	8,62
501,103	528,287	608,307	599,229	680,103	20,0	20,1	29997,08	21,29	8,61
499,001	524,254	603,511	594,517	674,781	20,3	20,4	30116,24	21,56	8,54
500,779	522,736	599,969	590,841	668,299	20,8	20,9	29988,92	23,15	8,30
499,978	519,861	595,146	586,122	661,675	21,0	21,1	30032,43	24,13	8,17
500,818	519,565	593,337	584,325	658,541	21,2	21,3	29964,68	24,95	8,07
500,896	518,348	590,231	581,251	654,022	20,3	20,5	29992,53	25,87	8,06
500,852	516,951	586,402	577,588	648,985	20,1	20,2	29990,33	26,75	8,08
501,009	515,386	580,569	571,797	641,220	20,3	20,4	29960,09	28,03	8,44
499,944	512,902	573,697	565,016	633,202	20,5	20,6	30048,60	28,97	7,69
501,022	513,073	567,675	559,395	626,838	20,7	20,8	29976,27	29,97	7,54
500,117	511,146	557,673	549,404	616,321	20,9	21,0	30042,34	30,69	7,35
500,394	510,712	548,680	540,108	598,562	21,2	21,3	30006,38	31,52	6,93
501,459	511,262	544,334	535,372	575,184	20,2	20,3	29948,57	32,52	6,29
501,914	510,962	539,623	530,456	559,214	20,4	20,5	29938,42	33,41	5,72
503,801	510,562	527,284	519,076	532,824	20,7	20,7	29802,45	34,26	4,72
500,816	505,496	517,869	509,260	518,679	21,0	21,0	29999,21	35,22	4,45
499,818	503,937	515,106	506,279	514,323	21,1	21,2	30049,18	35,91	4,39
500,272	503,926	514,561	505,545	512,903	20,7	20,8	30033,44	36,45	4,31
499,847	502,963	511,979	502,717	508,244	19,9	20,0	30075,84	37,63	4,25
501,016	503,877	512,509	503,307	508,232	20,2	20,2	30006,10	38,41	4,19
498,750	500,543	507,423	497,802	500,342	20,4	20,5	30142,89	39,64	4,08

Tabela I.118 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 40000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,254	166,361	247,298	239,111	316,644	20,7	20,8	39953,07	0,00	10,68
99,975	163,308	242,740	234,065	310,249	20,1	20,2	39919,11	1,48	10,60
99,081	160,008	238,030	229,137	304,279	20,6	20,7	40011,99	2,16	10,48
99,756	159,079	236,220	227,201	301,843	21,0	21,1	39981,85	2,57	10,43
99,642	157,488	234,055	224,832	298,839	20,4	20,5	40063,17	2,85	10,45
100,970	118,888	188,733	180,796	253,849	20,2	20,3	40001,74	3,23	9,66
99,380	110,429	178,946	171,141	243,270	20,5	20,6	40090,69	3,45	9,38
102,179	108,786	176,800	169,020	240,872	20,9	21,0	39955,43	3,68	9,17
100,800	97,520	163,043	155,190	226,155	21,3	21,3	40000,22	3,98	8,89
101,065	95,287	159,772	151,840	222,382	20,5	20,7	40021,73	4,19	8,77
100,762	90,547	152,419	144,355	213,677	20,0	20,1	40036,19	4,66	8,60
101,308	89,205	149,740	141,565	210,251	20,2	20,3	40005,01	4,90	8,49
101,981	87,331	144,912	136,748	204,474	20,5	20,5	39958,09	5,29	8,34
111,468	98,088	104,522	88,709	87,404	21,2	21,2	39539,38	5,68	5,82
113,797	98,208	93,575	75,636	55,654	20,1	20,3	39456,65	6,20	4,61

Tabela I.119 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 40000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
299,396	366,230	446,978	438,836	515,786	21,3	21,4	40011,55	0,00	10,85
301,215	367,010	447,224	438,826	515,497	20,8	20,9	40068,93	0,98	10,79
299,141	362,519	441,387	432,768	508,159	20,6	20,6	40049,47	2,55	10,67
299,741	361,970	440,121	431,321	506,222	21,0	21,1	40028,93	3,36	10,61
300,169	362,024	439,765	430,816	505,375	21,3	21,4	40014,12	3,81	10,58
302,318	363,682	441,157	432,341	506,603	20,3	20,4	39946,51	4,27	10,56
299,878	360,603	437,603	428,555	502,419	20,1	20,1	40076,64	4,56	10,55
300,891	361,045	437,734	428,514	502,077	20,4	20,4	40020,35	5,08	10,51
298,028	357,049	432,976	423,635	496,379	20,6	20,7	40156,54	5,55	10,48
300,670	359,045	434,551	425,177	497,664	20,9	20,9	40040,18	6,12	10,43
299,070	356,597	431,545	422,002	493,933	21,1	21,1	40109,75	6,51	10,40
300,786	356,228	430,684	421,211	492,741	21,3	21,4	39999,36	7,18	10,35
301,497	341,924	416,175	406,727	477,586	20,6	20,7	39978,47	7,77	10,10
300,707	313,342	380,613	372,629	442,018	20,2	20,3	40065,07	8,57	9,36
301,369	310,437	377,532	369,406	438,530	20,7	20,8	40022,10	8,81	9,25
301,265	306,692	372,757	364,721	433,117	20,9	21,0	40010,34	9,30	9,12
301,620	297,631	361,989	353,816	421,136	21,2	21,3	40013,06	10,16	8,81
300,230	293,014	355,980	347,678	414,135	21,2	21,3	40035,41	10,78	8,66
299,837	289,455	350,760	342,502	407,876	20,8	20,9	40031,17	11,57	8,53
298,964	287,508	348,252	339,925	405,004	20,4	20,6	40042,26	11,85	8,47
299,858	285,762	344,737	336,258	400,214	20,1	20,2	40029,09	12,74	8,33
299,200	282,999	340,142	331,422	394,257	20,4	20,5	40058,67	13,34	8,23
302,079	284,867	340,509	331,855	393,995	20,6	20,7	39934,67	14,06	8,14

301,419	282,426	331,649	322,498	383,383	20,8	20,9	39959,63	14,71	7,98
300,028	278,388	268,214	248,381	226,772	21,2	21,3	40016,83	15,56	4,43
300,908	278,809	266,625	246,634	222,404	21,2	21,3	39996,56	15,91	4,20
301,973	278,249	261,481	240,605	209,437	20,5	20,6	39950,24	16,83	3,91

Tabela I.120 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 40000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,177	567,165	647,551	639,234	715,523	21,1	21,2	39978,04	0,00	10,92
500,989	566,520	646,080	637,742	713,396	19,9	20,0	39947,56	1,93	10,83
500,534	565,577	644,938	636,428	711,902	20,4	20,5	39954,32	2,27	10,78
498,358	563,210	642,055	633,471	708,633	20,8	20,9	40057,32	2,58	10,77
499,550	563,848	642,233	633,506	708,262	20,3	20,4	39992,06	3,74	10,68
498,589	562,035	639,793	631,059	705,267	20,3	20,4	40027,10	4,57	10,66
498,864	561,719	639,212	630,316	704,310	20,5	20,6	39992,42	5,10	10,64
500,019	562,211	639,219	630,159	703,561	21,1	21,2	40118,87	5,50	10,61
500,249	561,751	638,310	629,177	702,204	21,4	21,5	40075,64	6,24	10,67
500,238	561,040	637,096	627,930	700,574	20,9	21,0	40086,41	7,02	10,57
501,048	561,658	637,668	628,371	700,926	20,4	20,5	40074,69	7,42	10,55
500,467	560,397	635,790	626,466	698,397	20,2	20,2	40114,33	8,20	10,51
501,967	561,531	636,665	627,274	698,989	20,4	20,4	40040,51	8,79	10,48
499,961	558,701	633,368	623,837	695,001	20,7	20,7	40113,94	9,31	10,45
502,050	560,339	634,699	625,100	695,948	20,9	20,9	40037,95	10,09	10,41
501,185	558,777	632,571	622,901	693,293	21,2	21,2	40051,02	10,63	10,39
500,389	557,029	630,219	620,436	690,174	21,4	21,4	40107,00	11,39	10,34
500,859	555,937	628,741	618,783	688,147	21,2	21,4	40084,96	12,10	10,30
501,165	547,906	620,484	610,671	679,331	20,7	20,9	40052,13	12,84	10,14
502,857	538,589	606,604	597,853	666,384	20,1	20,3	40002,04	13,47	9,83
501,419	532,048	598,003	589,710	657,568	20,2	20,3	40050,01	14,07	9,71
500,668	518,617	584,039	575,583	642,437	20,5	20,6	40077,32	14,90	9,42
499,335	505,636	570,212	561,927	627,977	21,0	21,1	40081,90	15,43	9,14
499,826	502,777	566,802	558,537	624,111	21,3	21,3	40076,84	16,02	9,02
500,800	498,408	561,900	553,613	618,818	21,5	21,6	40023,26	16,65	8,85
501,707	498,094	561,285	552,923	617,996	21,0	21,1	40011,37	17,06	8,79
501,919	495,845	558,073	549,727	613,978	20,6	20,7	40024,88	17,83	8,69
502,804	494,788	556,278	547,806	611,469	20,1	20,2	40021,95	18,63	8,60
501,385	491,524	552,004	543,454	606,319	20,1	20,2	40069,72	19,33	8,53
501,901	491,104	551,082	542,502	605,022	20,4	20,4	40080,24	19,73	8,47
501,387	487,576	545,709	536,973	598,096	20,7	20,8	40077,44	21,14	8,32
501,795	487,140	544,523	535,811	596,498	21,0	21,1	40054,70	21,68	8,26
502,543	485,425	540,553	531,602	590,959	21,3	21,4	40000,72	23,19	8,12
501,938	483,811	537,849	528,778	587,254	20,8	20,9	40041,03	23,77	8,06
502,072	483,027	535,919	526,719	584,389	20,1	20,3	40046,56	24,44	7,99
501,214	481,170	533,062	523,804	580,629	20,2	20,2	40062,61	24,95	7,94
500,071	479,562	530,754	521,288	577,765	20,5	20,6	40128,90	25,01	7,92
506,610	486,459	516,512	504,694	560,545	20,9	21,0	39803,12	25,82	7,43
494,470	469,243	456,380	435,669	413,169	21,2	21,3	40372,81	27,03	4,25

Tabela I.121 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,0.BEP} = 40000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
703,052	769,921	850,172	841,565	917,603	21,2	21,3	39999,68	0,00	10,81
702,114	767,657	847,175	838,420	913,741	20,5	20,6	40085,34	1,98	10,73
704,200	768,361	847,250	838,449	913,056	20,6	20,7	39972,61	3,93	10,71
704,320	767,958	845,705	836,870	910,778	21,1	21,2	39991,40	5,51	10,68
702,978	766,272	843,873	834,852	908,483	21,5	21,6	40039,35	5,91	10,70
698,926	761,582	838,416	829,186	902,244	21,1	21,2	40220,99	6,58	10,75
704,283	766,616	843,593	834,753	907,917	20,6	20,7	40003,11	7,44	10,71
699,270	760,882	837,120	827,732	900,410	20,3	20,4	40222,94	7,96	10,71
703,545	765,130	841,594	832,432	905,232	20,0	20,1	40049,03	8,34	10,69
702,780	763,686	840,089	830,806	902,945	20,2	20,3	40081,64	8,90	10,67
703,844	764,656	840,996	831,791	903,823	20,5	20,5	40017,55	9,31	10,63
700,330	760,823	836,192	826,773	898,333	20,9	20,9	40172,49	10,04	10,56
702,413	762,923	838,394	828,895	900,567	21,1	21,2	40055,75	10,44	10,53
700,986	760,693	835,351	825,806	896,666	21,7	21,7	40117,57	11,53	10,47
703,384	762,522	837,086	827,444	898,059	21,3	21,4	40015,76	12,56	10,44
700,258	758,394	832,293	822,422	892,398	20,9	21,0	40171,41	13,35	10,41
700,954	758,452	831,985	822,022	891,629	20,6	20,7	40129,31	14,26	10,39
701,910	759,026	832,343	822,347	891,824	20,2	20,4	40100,52	14,93	10,38
703,808	760,320	833,216	823,337	892,344	20,7	20,7	39997,21	15,94	10,32
701,378	756,146	828,222	818,139	886,352	21,0	21,0	40088,68	16,93	10,30
703,346	756,853	828,703	818,537	886,475	21,2	21,3	40004,23	17,83	10,22
698,801	744,844	815,801	805,546	872,250	21,4	21,5	40190,28	18,84	10,08
704,597	738,720	806,241	797,268	864,130	21,0	21,1	39944,30	19,45	9,80
701,469	731,851	796,743	788,201	854,419	20,6	20,7	40127,91	20,11	9,68
704,068	730,176	795,476	786,925	852,774	20,3	20,4	39997,73	20,83	9,57
704,394	728,300	793,029	784,464	850,096	20,2	20,2	39985,05	21,33	9,51
705,396	722,948	787,200	778,759	844,145	20,5	20,6	39943,30	21,99	9,34
702,878	707,834	771,382	762,811	827,048	21,0	21,0	40070,27	22,84	9,07
703,341	705,943	768,974	760,363	824,227	21,3	21,4	40031,03	23,52	9,07
700,930	699,460	761,644	753,042	816,159	21,5	21,6	40145,20	24,17	8,96
703,198	698,755	760,700	752,142	815,169	21,4	21,6	40004,59	25,02	8,85
702,276	695,939	757,213	748,512	810,886	21,1	21,2	40079,53	25,68	8,78

Tabela I.122 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
101,753	144,998	197,865	183,077	227,718	20,1	20,3	49993,23	0,00	10,59
98,597	134,893	182,892	167,040	208,679	20,5	20,5	50075,49	1,36	10,48
99,121	130,656	173,776	157,347	196,051	21,3	21,4	50052,29	2,14	10,35
103,486	128,902	171,249	154,401	191,708	20,9	21,0	49932,21	2,50	10,24
104,338	128,019	168,785	151,810	188,317	20,2	20,2	49918,14	2,74	10,20
102,971	123,817	162,378	145,093	179,971	20,9	20,9	49946,58	2,93	10,13

115,130	83,275	111,255	92,710	119,688	21,3	21,4	49523,60	3,12	8,87
114,907	76,097	94,494	74,760	84,076	21,4	21,5	49519,34	3,38	8,33

Tabela I.123 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
302,099	345,754	398,673	383,587	427,224	21,1	21,2	50025,30	0,00	10,59
301,000	340,007	390,423	374,990	416,698	20,1	20,2	50063,58	2,10	10,43
299,844	339,020	387,876	372,099	412,262	20,5	20,5	50102,91	2,92	10,39
300,123	335,860	384,177	368,083	407,584	21,1	21,1	50097,16	3,39	10,29
302,054	337,442	385,360	369,326	408,643	21,1	21,3	50010,12	3,78	10,23
301,283	338,457	385,469	369,266	407,503	20,7	20,8	50042,83	4,31	10,25
301,041	333,839	380,109	363,586	401,207	20,3	20,4	50065,98	4,71	10,19
300,977	335,353	380,373	363,728	400,195	20,2	20,3	50069,34	5,36	10,21
300,786	332,582	375,944	359,076	394,326	20,7	20,8	50068,12	6,06	10,09
303,834	332,201	375,819	358,784	393,687	21,0	21,1	49948,36	6,48	10,01
302,220	330,520	372,273	355,024	388,424	21,3	21,4	50018,22	7,12	9,97
299,461	326,134	366,058	348,363	380,435	21,5	21,6	50093,52	7,59	9,89
301,079	324,253	363,558	345,666	376,812	21,1	21,2	50037,47	8,09	9,80
302,361	324,931	362,918	345,112	375,586	20,6	20,8	49993,95	8,66	9,75
308,654	306,294	343,386	325,587	355,202	20,2	20,3	49812,92	9,06	9,30
302,037	263,988	295,385	276,166	298,519	20,4	20,5	50015,01	9,70	8,37
303,307	263,121	293,300	273,931	294,943	21,0	21,1	49953,76	10,10	8,20
304,795	253,281	280,909	261,102	278,790	21,3	21,4	49906,59	10,63	7,77

Tabela I.124 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,997	544,696	597,056	581,858	624,600	21,0	21,0	50036,85	0,00	10,37
502,501	543,680	594,967	579,571	621,130	21,1	21,2	50016,57	1,98	10,25
502,475	542,878	593,669	578,087	619,247	20,7	20,8	50012,63	2,61	10,21
501,226	540,815	591,215	575,516	616,184	20,2	20,4	50036,28	3,11	10,16
500,271	541,825	591,174	575,423	615,623	20,2	20,3	50056,89	3,74	10,17
499,428	540,273	589,261	573,471	613,279	20,8	20,8	50041,53	4,12	10,18
497,369	536,229	583,923	567,930	606,658	21,1	21,2	50109,03	4,90	10,09
499,110	536,747	584,387	568,463	607,324	21,6	21,7	50006,91	5,33	10,07
500,740	536,655	584,643	568,513	607,003	20,4	20,5	49946,99	5,79	10,06
500,815	536,539	584,150	567,988	606,072	20,3	20,4	49941,10	6,21	10,04
498,440	535,140	581,332	565,005	602,344	20,3	20,4	49967,89	6,94	10,04
500,222	533,811	580,068	563,419	599,817	20,6	20,6	49946,33	7,75	10,00
500,481	533,374	578,873	562,173	598,367	21,1	21,2	49902,49	8,20	9,94
499,060	532,818	576,997	560,151	595,357	21,5	21,6	49954,67	8,95	9,94
499,972	532,099	576,295	559,234	593,792	20,9	21,1	49941,61	9,51	9,92
499,723	531,409	574,220	557,058	590,904	20,6	20,7	49912,94	10,44	9,86

498,711	529,127	570,995	553,637	586,384	20,4	20,4	49987,16	11,08	9,82
500,302	529,271	570,484	553,180	585,343	20,8	20,9	49912,56	11,88	9,83
499,940	526,935	566,752	549,118	580,060	21,2	21,3	49919,80	12,89	9,70
499,285	522,836	561,400	543,361	573,196	21,3	21,4	49926,07	13,72	9,58
499,741	518,730	556,086	537,663	565,493	20,5	20,7	49907,58	15,07	9,47
501,800	514,846	551,258	532,833	560,053	20,2	20,4	49864,24	15,64	9,33
502,554	509,457	543,936	524,908	549,810	20,6	20,7	50160,78	15,90	9,17
504,433	506,933	541,355	522,319	547,044	21,2	21,4	50061,12	16,28	9,08
503,750	503,112	536,390	517,133	540,984	20,7	20,8	50105,72	16,69	9,00
505,423	492,892	527,039	508,206	532,777	20,2	20,4	49802,33	16,95	8,81
499,499	467,658	499,375	479,722	500,540	21,0	21,1	49971,45	17,50	8,33
500,238	467,471	498,390	478,620	498,965	21,4	21,4	49915,07	18,02	8,16
501,559	457,985	487,063	467,043	484,872	20,8	21,0	49928,15	18,92	7,80
500,916	454,851	482,199	461,864	477,737	20,6	20,7	49938,50	19,65	7,68
502,826	443,889	468,992	448,245	461,252	20,2	20,3	49871,91	20,72	7,22
500,056	436,659	458,210	436,677	443,797	20,2	20,3	49979,63	21,76	6,94

Tabela I.125 – Teste bifásico água-ar, vazão de líquido constante,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 800 \text{ kPa}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 50000 \text{ kg/h}$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
698,953	741,406	792,747	777,504	819,453	21,1	21,2	49944,70	0,00	10,50
700,050	739,904	790,524	775,055	815,931	21,4	21,5	49968,29	2,05	10,46
698,908	737,556	786,916	771,113	810,770	21,0	21,1	49989,42	3,98	10,38
701,635	742,055	789,984	773,824	811,968	20,6	20,7	50047,82	5,82	10,36
701,782	737,949	785,813	769,592	807,569	20,3	20,4	50054,00	6,42	10,25
702,829	740,072	787,960	771,738	809,339	20,9	20,9	50017,21	6,81	10,28
700,064	734,499	780,942	764,448	800,875	21,4	21,4	50097,68	8,00	10,18
699,018	735,244	780,880	764,313	800,241	21,6	21,7	50109,05	8,67	10,26
701,016	734,591	780,865	764,146	799,914	21,2	21,3	50064,22	9,01	10,29
703,033	735,870	781,201	764,521	799,960	20,8	20,9	49993,04	10,16	10,26
696,459	728,697	772,504	755,294	789,065	20,5	20,7	50208,25	10,86	10,22
700,712	734,820	779,108	762,098	796,101	20,3	20,4	50099,21	11,29	10,23
698,562	730,585	773,301	756,051	788,974	20,8	20,8	50150,72	12,41	10,13
699,099	730,275	771,889	754,397	786,302	21,6	21,7	50065,74	14,15	10,02
698,901	725,741	766,997	749,140	780,027	21,4	21,5	50053,08	15,16	9,94
698,650	727,587	767,686	749,841	780,219	21,1	21,3	50046,92	16,05	9,93
700,572	725,992	766,154	748,132	777,626	20,9	21,0	50007,02	17,05	9,86
699,792	726,318	765,062	746,824	775,896	20,6	20,7	50028,02	17,89	9,84
700,635	722,915	761,644	743,090	771,150	20,4	20,5	50012,82	18,79	9,77
701,632	725,364	762,812	744,298	771,777	20,6	20,6	49975,55	19,76	9,78
699,923	721,181	757,354	738,404	764,890	20,9	21,0	49991,77	20,75	9,71
700,874	719,005	755,201	736,147	761,590	21,3	21,4	49996,17	21,43	9,66
700,379	718,993	753,884	734,846	759,707	21,7	21,8	49985,71	22,20	9,60
699,211	716,823	750,726	731,373	755,500	21,7	21,8	50008,35	22,88	9,55
697,457	712,338	745,149	725,411	747,908	21,3	21,4	50072,50	23,81	9,46
699,130	703,759	735,631	715,681	737,256	20,9	21,0	50005,53	24,92	9,27
702,337	699,411	731,286	711,358	732,848	20,5	20,6	49923,42	25,27	9,11
700,584	683,108	713,797	693,364	713,128	20,7	20,8	49970,15	26,01	8,78



Tabela I.126 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 49,9^\circ\text{C}, \mu = 76 \text{ cP}, \rho = 1227 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
40,679	40,293	44,056	39,786	40,874	49,9	50,1	17513,85	2,84
42,660	42,879	47,072	42,966	44,549	50,1	50,2	17296,31	2,82
50,600	52,526	58,168	54,344	57,586	50,0	50,2	16388,41	2,83
53,580	57,471	64,659	61,102	66,418	50,0	50,1	15332,53	2,85
61,013	66,397	74,877	71,769	78,563	50,0	50,2	14364,46	2,83
74,895	82,554	93,013	90,301	99,086	50,2	50,3	12739,56	2,81
88,262	97,152	109,120	106,398	116,937	50,1	50,2	11370,63	2,77
99,080	108,891	121,889	119,104	130,599	50,0	50,1	10242,34	2,74
100,084	111,007	124,847	122,240	134,633	49,8	49,9	9001,92	2,71
111,632	125,764	141,000	139,506	154,215	49,9	50,1	7332,95	2,95
122,544	137,391	153,326	152,410	168,162	49,9	50,1	6211,77	2,93
125,352	141,220	157,574	157,009	173,558	49,9	50,1	5149,21	2,89
131,654	148,499	165,795	165,515	183,504	49,8	50,1	3802,21	2,87
130,418	147,650	165,327	165,179	183,787	49,8	50,1	3057,54	2,85
132,347	150,214	168,315	168,233	187,927	49,8	50,0	2005,45	2,85
82,706	100,743	119,966	119,707	140,439	49,7	50,0	1170,44	2,79
13,933	32,678	52,935	52,447	74,939	49,6	50,2	89,58	2,73

Tabela I.127 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 41,3^\circ\text{C}, \mu = 115 \text{ cP}, \rho = 1233 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
47,008	47,313	52,079	47,348	47,959	41,1	41,3	16021,71	3,66
50,453	51,479	56,870	52,383	53,784	41,1	41,3	15596,55	3,64
50,066	52,375	58,900	54,665	57,552	41,4	41,6	14908,06	3,61
50,678	54,563	62,306	58,468	62,986	41,4	41,6	13970,49	3,60
59,032	64,184	72,930	69,342	75,164	41,2	41,3	13194,56	3,68
68,442	75,260	85,318	81,961	89,409	41,3	41,4	12140,21	3,64
77,243	85,108	96,277	93,024	101,780	41,3	41,4	11217,13	3,59
84,203	93,002	105,449	102,358	112,452	41,3	41,4	10173,96	3,54
93,147	103,626	117,201	114,522	126,088	41,3	41,4	8932,57	3,46
102,622	115,561	130,682	128,567	142,287	41,3	41,4	7281,96	3,71
109,773	123,470	139,232	137,367	152,050	41,3	41,4	6214,96	3,72
132,739	147,783	164,302	163,006	178,789	41,3	41,4	4954,05	3,66
124,358	140,092	157,149	155,872	172,627	41,3	41,4	4130,57	3,63
131,310	147,766	165,387	164,175	182,201	41,3	41,4	3140,48	3,64
141,339	158,605	176,984	176,368	195,405	41,3	41,5	1889,19	3,60
56,750	74,292	93,165	92,474	112,509	41,3	41,7	1133,29	3,52
16,735	34,782	54,702	53,911	75,465	41,2	42,1	128,93	3,45



Tabela I.128 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 33,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 188 \text{ cP}, \rho = 1238 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
53,673	53,322	58,221	53,326	53,855	33,4	33,4	14544,70	4,85
54,610	55,438	61,204	56,596	58,373	33,5	33,5	13982,09	4,82
62,547	64,928	71,909	67,634	71,022	33,4	33,5	13125,53	4,80
76,728	80,960	89,477	85,662	90,898	33,4	33,4	12013,21	4,76
73,323	78,774	88,347	84,680	91,288	33,4	33,5	11232,38	4,69
86,597	93,914	105,146	101,836	110,419	33,4	33,6	9908,09	4,60
110,268	119,090	131,548	128,583	138,699	33,5	33,6	8824,51	4,49
115,221	125,295	138,557	135,969	147,300	33,5	33,6	8016,35	4,40
103,111	114,533	128,638	126,177	138,569	33,5	33,6	7150,07	4,69
115,563	128,146	143,064	140,887	154,371	33,5	33,6	6029,75	4,72
78,529	91,807	107,312	105,327	119,774	33,6	33,7	5253,14	4,61
89,742	104,624	120,819	119,038	134,689	33,6	33,7	4115,82	4,62
97,635	112,990	129,918	128,224	144,637	33,6	33,7	3336,18	4,62
74,936	91,109	108,378	106,818	124,150	33,7	33,9	2473,13	4,57
48,303	64,790	82,639	81,136	99,398	33,6	34,0	1698,39	4,55
37,164	53,922	72,222	70,816	89,778	33,6	34,2	919,54	4,51
19,143	36,079	54,889	53,565	73,180	33,6	34,9	394,27	4,42
13,932	31,331	50,452	49,153	68,915	33,6	34,6	151,43	4,36

Tabela I.129 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 251 \text{ cP}, \rho = 1240 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
57,071	56,826	61,859	56,758	57,354	29,6	29,5	13380,33	5,50
69,478	71,079	77,657	73,036	75,523	29,6	29,5	12407,62	5,47
73,687	76,745	84,375	79,984	83,900	29,5	29,3	11641,67	5,43
86,685	91,734	101,027	97,135	103,064	29,4	29,2	10423,76	5,36
91,171	97,741	108,431	104,808	112,440	29,2	29,3	9426,65	5,29
104,645	113,234	125,306	122,307	131,910	29,3	29,4	8139,98	5,16
115,909	126,111	139,301	136,346	147,369	29,5	29,5	7059,39	5,35
128,523	140,005	154,049	151,367	163,603	29,5	29,6	5971,60	5,37
93,280	105,471	120,166	117,703	130,929	29,6	29,6	5276,60	5,28
46,198	59,492	75,049	72,889	87,633	29,6	29,7	4279,59	5,30
38,239	52,941	69,417	67,541	83,509	29,6	29,8	3057,62	5,29
46,223	61,753	78,901	77,194	94,078	29,6	29,9	2037,76	5,27
55,498	71,806	89,863	88,157	106,130	29,6	30,3	916,09	5,14
21,612	38,234	56,521	54,799	73,499	29,6	30,8	605,02	5,07
24,255	41,124	59,935	58,257	77,490	29,6	31,5	218,81	4,89

Tabela I.130 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 24,9 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 356 \text{ cP}, \rho = 1252 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
60,738	60,272	65,470	60,247	60,876	25,1	25,1	11896,13	6,26
64,601	64,968	70,763	65,651	67,074	25,0	25,0	11510,56	6,24
70,123	71,527	78,124	73,249	75,612	25,1	25,1	11035,52	6,17
79,663	82,752	90,602	86,136	90,225	25,0	25,1	10130,58	6,11
92,999	98,018	107,321	103,275	109,226	24,9	25,0	9019,72	6,06
97,633	103,894	114,263	110,495	118,021	25,0	25,0	8211,71	6,01
104,282	112,056	123,410	120,059	129,022	24,8	25,0	7246,11	5,86
106,694	115,557	127,940	124,500	134,448	24,9	25,0	6322,80	6,10
118,085	128,196	141,509	138,297	149,407	24,8	25,0	5367,76	6,05
127,923	139,723	154,184	151,346	164,090	24,8	25,1	4177,26	6,07
147,692	160,849	176,244	173,649	187,593	24,8	25,1	3246,12	6,02
141,857	156,357	172,624	170,281	185,485	24,8	25,3	2193,50	6,00
127,683	143,167	160,526	158,276	174,831	24,8	25,6	1155,01	5,93
53,705	69,506	87,173	84,975	102,453	24,8	25,9	810,31	5,83
30,805	47,443	66,047	64,176	83,159	24,9	26,8	182,37	5,46

Tabela I.131 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 21,6 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 465 \text{ cP}, \rho = 1245 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
64,659	63,737	69,315	63,872	64,881	21,3	21,5	10652,27	7,02
72,573	73,164	79,852	74,695	77,154	21,6	21,6	9914,05	6,94
77,446	78,892	86,212	81,269	84,483	21,6	21,6	9495,64	6,92
81,043	83,917	92,183	87,527	92,095	21,6	21,6	8768,78	6,88
91,588	96,034	105,488	101,194	107,300	21,6	21,6	7887,79	6,79
109,819	115,612	126,102	122,122	129,389	21,6	21,7	7064,39	6,71
120,242	127,439	138,932	135,215	143,828	21,6	21,7	6230,27	6,57
131,880	140,435	152,788	149,074	158,732	21,7	21,8	5303,34	6,91
77,697	87,750	101,208	97,817	109,132	21,5	21,8	4248,70	6,87
81,550	93,151	107,652	104,552	117,272	21,7	21,8	3270,33	6,62
91,941	105,168	120,749	117,946	132,108	21,8	22,1	2184,22	6,60
97,392	112,390	129,560	127,020	143,263	21,8	22,7	855,60	6,52
36,670	52,975	71,402	69,287	87,666	21,8	23,4	193,61	6,07

Tabela I.132 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 599 \text{ cP}, \rho = 1247 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
63,619	62,633	68,546	62,924	63,908	18,5	18,8	9309,14	7,64

67,777	67,458	73,991	68,651	70,290	18,5	18,9	8989,49	7,56
75,269	77,025	84,976	80,096	83,648	18,4	19,0	8019,25	7,48
74,716	77,345	85,803	80,924	85,251	18,5	19,1	7693,13	7,41
71,181	74,844	83,835	79,349	84,404	18,5	19,2	7197,01	7,33
82,343	87,697	98,057	93,813	100,612	18,7	19,2	6232,27	7,19
95,228	102,007	113,374	109,425	117,470	18,6	18,4	5106,84	7,30
112,491	120,606	132,953	128,887	138,052	18,3	17,9	4033,40	7,69
122,291	131,678	144,994	141,131	151,655	18,3	18,5	3513,70	7,64
131,518	142,428	156,827	153,253	165,101	18,7	18,4	2591,29	7,68
132,128	144,525	159,951	156,669	169,940	18,6	18,4	1733,14	7,68
126,056	140,188	156,994	154,064	169,324	18,8	19,0	762,31	7,61
48,499	64,221	82,496	80,121	97,836	19,2	19,9	173,26	6,81

Tabela I.133 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 14,8 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 823 \text{ cP}, \rho = 1250 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
61,297	60,234	66,428	60,407	61,595	14,4	13,8	6623,42	8,72
63,108	64,634	72,454	67,020	70,407	14,4	14,6	6024,00	8,45
60,554	63,614	72,552	67,382	72,256	14,3	14,8	5431,77	8,31
65,922	71,163	81,630	77,025	83,941	14,8	15,0	4492,10	8,13
82,614	90,009	101,970	97,726	106,501	14,8	15,2	3557,13	7,97
76,804	86,104	99,371	95,354	105,777	15,1	15,5	2621,50	8,37
95,591	109,632	126,384	123,292	138,458	15,6	16,2	581,69	8,18
71,718	87,363	105,412	102,891	119,964	16,0	17,2	196,31	7,48

Tabela I.134 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1200 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 11,8 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 1057 \text{ cP}, \rho = 1252 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
55,963	55,087	61,439	55,197	56,141	11,7	11,0	5216,61	9,31
52,853	52,826	59,788	53,710	55,391	11,7	11,0	4956,67	9,28
46,578	47,336	54,899	49,051	51,526	11,7	11,2	4752,18	9,19
51,963	53,244	61,169	55,399	58,393	12,0	10,8	4412,66	9,28
62,599	64,790	73,456	67,930	71,811	11,7	10,9	4062,78	9,25
71,268	75,356	85,136	80,014	85,475	11,8	11,3	3638,00	9,11
83,144	88,617	99,279	94,454	101,139	11,5	11,1	3081,37	9,11
100,463	107,866	119,841	115,320	123,865	11,6	11,6	2454,34	9,40
108,400	116,651	129,388	125,035	134,455	11,6	11,8	2161,87	9,34
116,336	126,488	140,466	136,514	147,697	11,9	12,2	1551,64	9,32
126,957	138,722	153,812	150,166	162,915	11,9	12,5	1041,06	9,29
133,069	146,551	162,811	159,546	173,906	12,9	13,9	586,84	9,00
84,782	99,999	117,713	115,006	131,542	13,4	14,4	211,42	8,33

Tabela I.135 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 76 \text{ cP}, \rho = 1227 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
81,910	80,383	88,836	81,732	82,463	49,9	50,0	27555,83	5,58
70,130	72,642	84,438	78,228	83,598	50,0	50,1	26025,62	5,62
68,999	75,261	90,055	84,761	94,306	50,0	50,2	24619,62	5,64
77,896	90,472	110,100	105,943	122,182	50,0	50,2	22042,84	5,67
70,426	86,506	109,004	105,521	125,320	50,0	50,1	20361,74	5,62
78,180	99,763	126,903	123,452	148,386	49,9	50,1	17980,37	5,60
95,342	121,449	152,656	149,997	179,240	50,1	50,3	15366,71	5,64
64,268	93,953	127,128	125,714	158,633	50,0	50,2	12903,84	5,51
67,506	100,155	135,257	135,019	170,707	50,0	50,2	10978,36	5,46
59,018	95,129	132,073	133,793	172,896	49,9	50,1	8721,10	5,38
66,522	104,493	143,034	145,471	186,780	49,9	50,1	7015,20	5,32
82,763	121,996	161,936	164,705	208,157	49,9	50,1	5238,05	5,26
86,809	127,042	168,323	170,969	216,465	49,8	50,2	3214,99	5,16
34,379	76,571	122,270	123,386	173,397	50,0	50,7	80,35	5,08

Tabela I.136 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 41,3 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 115 \text{ cP}, \rho = 1233 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
88,757	88,419	96,951	89,170	89,240	41,3	41,4	26206,13	6,62
61,068	66,619	80,209	73,740	81,185	41,3	41,5	24018,28	6,65
49,520	59,435	76,940	71,501	84,300	41,3	41,5	22205,19	6,64
59,982	74,922	96,234	91,670	109,045	41,3	41,5	20158,17	6,49
78,212	97,397	122,685	118,301	139,992	41,3	41,4	18137,55	6,54
101,047	123,488	152,595	148,175	174,015	41,3	41,4	15829,34	6,37
125,745	152,827	185,082	181,676	211,556	41,2	41,4	13526,85	6,51
67,532	97,477	131,054	129,334	162,319	41,4	41,7	11901,11	6,38
86,969	119,992	155,334	155,279	191,297	41,4	41,7	9805,15	6,27
80,263	115,426	151,771	152,453	190,255	41,4	41,7	8211,01	6,16
53,201	90,584	129,647	131,187	173,176	41,4	41,8	5592,20	6,04
57,610	96,750	137,762	139,494	184,702	41,4	41,9	3419,16	5,98
37,928	78,917	124,515	125,482	174,956	41,4	42,8	169,19	5,81

Tabela I.137 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 33,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 188 \text{ cP}, \rho = 1238 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
98,396	98,365	107,386	99,153	98,786	33,5	33,7	24250,04	7,94
109,698	112,863	124,534	116,991	119,919	33,5	33,7	23172,74	8,00

113,594	122,784	139,337	133,091	142,740	33,5	33,7	20887,89	7,95
105,529	119,501	140,338	134,970	150,279	33,5	33,7	18729,76	7,68
111,451	129,161	153,692	148,600	168,548	33,5	33,7	16761,49	7,47
135,550	156,929	185,245	180,639	204,886	33,5	33,7	14553,42	7,22
118,927	146,924	179,514	176,542	206,674	33,5	33,7	11573,18	7,54
89,261	119,235	153,118	151,091	184,094	33,5	33,6	9926,59	7,44
99,644	133,484	169,838	169,323	205,352	33,4	33,7	7376,38	7,35
73,605	108,219	147,972	147,445	187,318	33,4	33,7	5147,90	7,26
60,873	98,720	138,772	138,629	181,398	33,3	33,8	3240,53	7,18
44,878	84,964	130,280	131,095	179,582	33,7	37,3	179,43	6,37

Tabela I.138 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 250 \text{ cP}, \rho = 1240 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
108,018	107,509	116,984	108,250	107,987	29,4	29,5	22721,91	8,94
80,372	84,424	97,751	90,288	95,761	29,4	29,4	20939,28	8,88
63,386	72,603	90,415	84,013	95,477	29,5	29,5	18901,31	8,69
70,240	84,155	106,060	100,481	117,317	29,6	29,6	16787,24	8,38
65,950	83,143	108,479	103,467	124,517	29,6	29,7	14984,67	8,15
98,762	121,750	151,263	147,039	172,778	29,7	29,5	12633,43	8,32
105,276	132,611	164,575	161,814	191,653	29,5	29,5	10558,76	8,31
68,050	96,090	128,967	126,646	157,916	29,5	29,5	9593,03	8,22
86,508	117,203	152,307	150,833	184,545	29,5	29,7	7730,27	8,16
87,402	121,458	157,793	156,162	192,698	29,5	29,8	6130,95	8,13
86,408	121,980	161,075	160,282	200,237	29,6	30,0	4018,62	8,07
67,409	104,486	144,597	144,036	188,012	29,6	30,4	2126,34	7,92
87,104	126,770	170,827	171,062	217,151	29,6	31,9	203,76	7,36

Tabela I.139 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 355 \text{ cP}, \rho = 1243 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
119,142	118,282	128,467	119,219	119,595	24,9	25,0	20760,54	9,97
90,470	93,503	106,957	98,810	103,802	25,0	25,1	19386,70	9,84
60,617	67,430	84,326	77,181	86,912	24,9	25,0	17755,46	9,73
59,445	70,461	90,958	84,593	99,132	25,1	25,1	16095,54	9,56
79,578	94,874	118,743	113,291	132,207	25,0	25,1	14263,98	9,23
100,548	120,377	147,183	143,023	166,348	25,0	25,1	12317,06	9,04
110,935	135,426	165,650	161,746	189,115	25,0	25,1	10027,36	9,26
90,508	117,710	150,108	146,987	177,309	25,0	25,1	8255,62	9,13
80,304	110,848	145,776	143,437	177,132	24,9	25,2	6356,66	9,11
70,919	104,055	141,086	139,343	176,057	24,8	25,3	4378,66	9,09
56,455	91,213	129,768	128,169	167,132	24,8	25,6	2944,95	8,99
33,856	71,140	113,550	112,815	156,954	24,9	27,2	179,21	8,21

Tabela I.140 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 468 \text{ cP}, \rho = 1245 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
122,592	121,261	132,469	123,075	124,188	21,7	21,7	18892,49	10,70
98,733	100,956	115,014	106,536	111,769	21,7	21,8	17651,52	10,56
74,752	80,674	97,858	90,296	99,866	21,6	21,7	16158,34	10,42
51,391	60,722	80,857	74,179	87,849	21,5	21,7	14732,67	10,22
42,914	55,086	77,568	71,770	88,751	21,4	21,7	13460,01	10,02
54,481	69,575	93,939	88,792	108,358	21,6	21,7	12394,92	9,84
53,079	70,957	97,369	92,824	115,232	21,6	21,7	11104,52	9,67
73,245	94,915	123,950	119,280	144,401	21,5	21,9	9349,45	9,86
69,961	94,446	125,696	121,652	149,868	21,4	21,7	7720,86	9,80
72,662	101,284	135,457	132,255	164,315	21,3	22,1	5813,94	9,69
51,976	82,976	119,040	116,345	151,288	21,5	22,2	4199,90	9,64
62,458	96,631	135,367	133,117	171,370	21,6	22,7	2216,13	9,54
40,508	77,152	119,285	117,961	161,200	21,9	24,4	172,32	8,70

Tabela I.141 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 602 \text{ cP}, \rho = 1247 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
133,229	130,509	141,798	132,023	133,125	18,4	18,4	16949,26	11,45
125,274	126,841	141,313	132,422	137,665	18,3	18,3	15581,26	11,36
99,061	105,610	124,018	116,384	127,217	18,7	18,8	14056,98	11,04
73,713	83,830	105,052	98,239	113,024	18,5	18,4	12360,14	10,95
62,264	75,491	99,007	92,879	110,791	18,0	18,4	11040,54	10,64
50,727	67,319	93,308	87,826	109,003	18,5	18,5	9794,19	10,28
40,384	60,940	90,065	84,839	109,729	18,5	19,8	8361,74	10,16
62,083	87,020	119,111	114,603	143,409	18,7	19,9	6467,97	10,08
58,976	86,437	120,192	116,354	147,504	18,5	20,1	5304,84	10,02
68,456	96,844	131,339	127,239	159,079	18,5	18,3	3977,46	10,40
54,249	84,327	120,194	116,405	150,008	18,6	18,3	3015,68	10,37
21,222	52,230	89,504	86,186	122,112	18,5	19,0	2189,65	10,20
46,594	82,952	124,777	123,157	165,788	18,5	21,0	166,00	9,23

Tabela I.142 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 14,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 840 \text{ cP}, \rho = 1250 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
207,632	204,473	216,773	206,668	208,315	14,6	15,1	14529,39	12,24
186,359	185,334	199,039	189,150	192,979	14,7	15,0	13816,78	12,18
157,883	159,514	175,090	165,959	172,482	14,6	14,8	12789,22	12,08

134,408	138,273	155,435	146,708	155,400	14,5	14,8	12075,62	12,00
117,449	124,563	144,162	136,124	148,123	14,5	15,1	11038,49	11,78
106,210	116,054	137,669	130,355	145,216	14,5	15,1	10019,99	11,61
110,858	127,380	153,869	147,039	169,336	14,5	14,4	6994,35	11,49
89,395	109,132	138,216	131,982	155,668	14,2	14,4	5578,38	11,48
49,971	72,650	104,042	98,164	125,178	14,3	13,8	4061,70	11,55
35,430	61,576	95,635	90,906	121,621	14,5	14,6	2866,98	11,34
50,597	81,419	118,662	114,519	150,035	14,7	16,0	1356,13	11,11
63,732	99,729	141,639	139,366	181,333	15,1	17,2	237,99	10,06

Tabela I.143 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 1800 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 11,7^\circ\text{C}, \mu = 1069 \text{ cP}, \rho = 1252 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
220,541	218,014	230,849	219,928	221,062	11,7	11,6	11698,46	12,80
212,942	213,186	227,807	217,292	221,169	11,7	11,6	10914,83	12,73
179,977	183,437	200,476	190,898	197,966	11,8	11,8	10081,17	12,62
155,148	161,423	180,559	171,520	181,675	11,7	11,6	8975,72	12,54
121,176	129,733	150,458	141,840	154,481	11,8	11,5	8111,59	12,42
78,654	89,949	112,989	104,944	120,590	11,7	11,2	6992,43	12,25
69,955	84,231	109,357	101,697	120,333	11,7	11,3	6063,02	12,14
109,596	128,852	157,132	150,216	172,754	11,6	12,1	4846,69	12,04
37,870	60,696	92,476	86,376	113,960	11,7	11,6	2947,63	12,09
53,031	80,584	115,577	110,310	142,370	11,6	12,4	1720,46	11,95
73,747	109,905	151,353	149,309	190,792	11,8	14,5	183,65	10,39

Tabela I.144 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 50,0^\circ\text{C}, \mu = 76 \text{ cP}, \rho = 1227 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
142,259	140,646	154,384	142,629	142,480	50,1	50,3	37916,08	8,83
97,686	103,050	123,452	113,740	122,546	50,1	50,3	35583,29	8,89
48,824	64,641	93,432	86,426	108,086	50,1	50,3	32511,38	8,91
70,888	95,034	130,266	124,884	154,932	50,2	50,3	30002,64	8,90
64,025	97,805	138,663	134,209	170,958	50,1	50,3	27622,06	8,92
66,983	107,261	153,782	149,901	193,811	50,1	50,3	24881,12	8,82
78,886	124,224	178,298	173,698	224,517	50,1	50,3	21939,75	8,95
60,700	109,700	166,861	163,516	218,341	50,0	50,2	19835,30	8,83
51,191	105,860	165,549	164,541	224,403	50,0	50,2	17017,85	8,65
46,443	107,781	172,723	175,258	242,813	50,0	50,2	13665,17	8,55
32,983	100,539	168,954	174,904	248,599	49,9	50,1	9957,51	8,37
54,770	124,787	196,182	202,700	280,684	49,8	50,2	6938,81	8,23
59,890	132,650	208,713	214,243	298,355	49,8	50,5	3108,39	8,12
17,065	92,499	173,935	177,128	265,575	50,5	51,7	97,53	7,88

Tabela I.145 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 41,4 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 115 \text{ cP}, \rho = 1233 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
152,200	152,464	165,538	153,609	152,661	41,3	41,4	36181,09	9,86
118,141	127,700	148,303	138,504	147,769	41,3	41,4	33658,39	9,99
120,167	135,720	160,985	152,690	168,777	41,4	41,5	31943,97	10,07
137,978	163,407	197,055	190,745	218,185	41,4	41,5	28834,74	10,11
106,967	138,630	177,748	172,486	206,306	41,3	41,5	26437,65	10,04
116,872	151,547	193,794	188,628	226,519	41,4	41,6	24737,70	9,97
144,398	183,893	231,735	226,581	270,702	41,4	41,6	22028,41	9,82
55,477	107,164	163,690	160,812	216,066	41,4	41,7	17048,57	9,89
40,058	96,229	154,840	154,080	213,190	41,4	41,7	15236,43	9,77
39,680	101,508	163,915	166,434	231,468	41,4	41,7	12282,79	9,59
56,825	122,193	186,579	190,568	259,311	41,4	41,8	10251,67	9,44
56,025	124,243	191,779	196,880	269,746	41,4	41,8	8122,67	9,33
45,328	115,589	185,566	191,263	268,254	41,4	41,9	5835,24	9,15
50,567	122,655	195,335	200,835	281,934	41,4	42,2	3544,20	9,04
36,525	113,810	193,886	197,352	285,085	42,3	43,7	85,74	8,76

Tabela I.146 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 33,6 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 187 \text{ cP}, \rho = 1237 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
164,912	165,382	179,679	166,485	165,123	33,5	33,6	33975,58	11,37
137,537	145,746	166,267	154,688	161,615	33,5	33,7	32069,45	11,48
123,553	139,362	166,038	156,264	171,843	33,6	33,7	30002,81	11,48
142,210	166,375	200,105	192,137	217,262	33,7	33,7	27347,70	11,50
86,189	116,274	155,582	148,356	180,468	33,7	33,8	25157,96	11,29
59,181	94,656	139,596	132,459	171,342	33,7	33,9	22756,47	11,09
32,964	75,667	127,622	120,943	166,580	33,7	33,9	19976,22	11,17
37,476	86,538	142,831	138,125	190,235	33,7	33,9	17210,45	11,03
58,056	113,161	172,258	170,529	228,464	33,4	33,7	14785,61	11,00
49,511	107,566	169,292	168,788	230,163	33,4	33,6	12803,01	10,82
39,500	102,262	165,984	167,552	232,694	33,6	33,8	10364,11	10,58
32,867	99,667	167,795	170,401	242,226	33,7	34,0	7501,13	10,41
27,538	97,066	167,610	171,090	247,705	33,7	34,2	5316,43	10,24
31,625	103,373	177,370	181,067	261,041	33,7	34,7	3199,10	10,14
43,180	118,643	198,802	201,866	288,554	33,7	36,5	210,24	9,63



Tabela I.147 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 250 \text{ cP}, \rho = 1240 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
172,372	172,856	187,427	174,289	173,214	29,5	29,6	32111,32	12,49
142,575	151,003	171,929	160,511	168,048	29,4	29,5	30152,35	12,55
114,622	132,395	161,086	151,602	169,487	29,3	29,5	27467,41	12,47
121,758	147,669	183,521	175,406	202,660	29,4	29,4	24750,29	12,35
116,767	148,691	190,127	182,660	217,141	29,2	29,3	22358,84	12,22
119,008	156,559	204,021	197,026	238,544	29,5	29,5	19867,87	11,89
114,991	162,784	217,492	212,301	262,326	29,6	29,7	16472,90	11,99
114,872	162,673	217,375	212,197	262,275	29,6	29,8	16473,49	11,98
121,777	176,002	234,317	232,124	289,076	29,6	29,8	13633,40	11,87
111,076	169,361	230,786	229,887	290,550	29,7	29,9	11523,20	11,70
81,184	144,747	210,797	210,999	278,289	29,6	29,9	8165,03	11,48
63,698	130,677	200,586	200,911	274,824	29,7	30,2	5356,22	11,30
33,162	103,506	173,722	175,622	252,288	29,7	30,6	3823,07	11,14
24,569	98,909	178,868	181,646	267,604	29,8	33,6	210,60	10,10

Tabela I.148 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 354 \text{ cP}, \rho = 1243 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
197,312	197,197	212,952	198,659	196,867	24,9	25,1	30152,62	13,63
147,947	157,823	181,505	169,492	178,835	24,9	25,0	27568,02	13,60
140,338	155,767	183,843	172,986	188,352	24,9	25,0	26019,14	13,57
138,472	162,344	197,607	188,419	213,367	25,0	25,1	23361,81	13,37
96,805	124,935	163,982	155,412	185,467	24,9	25,0	21800,15	13,18
83,731	116,632	160,290	152,538	188,037	24,9	25,1	19968,47	12,92
72,357	110,364	158,173	151,736	192,716	24,9	25,1	18035,38	12,71
63,115	107,607	160,046	154,421	200,883	25,0	25,1	15995,28	12,95
37,817	86,750	142,204	138,188	189,513	25,0	25,2	14167,60	12,75
64,631	118,346	177,306	174,220	230,400	25,0	25,2	11619,88	12,60
92,591	154,353	217,642	215,839	279,268	25,1	25,4	8277,57	12,54
62,596	126,858	194,454	193,783	261,827	25,1	25,7	5880,98	12,42
42,269	109,571	180,100	181,670	251,962	25,1	26,1	3654,72	12,23
19,343	87,409	158,590	159,711	238,198	25,1	27,5	1534,59	11,77
31,138	104,445	184,017	186,582	271,146	25,2	30,7	219,87	10,65

Tabela I.149 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 467 \text{ cP}, \rho = 1245 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
211,028	210,210	227,560	212,618	211,575	21,4	21,5	27868,91	14,68
154,905	164,606	189,978	177,558	187,850	21,4	21,6	25222,58	14,56
82,170	101,530	134,680	124,351	145,661	21,5	21,6	22410,44	14,23
55,496	81,151	119,608	110,491	138,813	21,5	21,6	20434,11	13,98
68,929	102,055	146,288	138,923	175,364	21,6	21,8	17957,65	13,70
95,912	135,598	184,412	179,227	222,143	21,6	21,8	15722,08	13,52
94,346	141,888	196,819	191,893	241,951	21,6	21,8	12285,54	13,59
107,469	160,629	219,772	216,430	272,771	21,4	21,9	9829,18	13,48
92,897	151,552	214,576	212,331	273,970	21,6	22,3	7498,78	13,46
79,483	141,336	206,776	205,128	270,451	21,6	22,4	5747,19	13,36
103,322	169,160	238,610	237,280	308,131	21,8	23,2	2998,50	13,07
72,088	144,331	221,665	223,538	304,695	22,1	26,8	205,35	11,45

Tabela I.150 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 599 \text{ cP}, \rho = 1247 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
227,689	225,901	243,883	228,226	227,751	18,4	18,5	25983,48	15,35
178,707	184,452	208,228	194,309	201,998	18,5	18,6	24173,91	15,18
123,230	137,806	168,496	156,461	173,622	18,5	18,7	21845,90	14,90
85,882	105,248	139,750	128,753	151,209	18,5	18,7	20457,91	14,72
57,175	84,803	125,643	116,746	147,912	18,5	18,7	17857,16	14,39
34,378	67,103	111,604	104,024	140,790	18,5	18,7	16184,88	14,19
65,221	105,040	154,308	148,497	192,037	18,7	18,9	13784,87	13,83
94,591	139,009	192,525	186,271	233,869	18,6	19,0	11625,88	14,10
45,944	95,070	151,899	146,763	199,098	18,4	19,0	9790,86	13,94
78,172	133,773	195,003	191,384	249,812	18,5	19,3	7285,10	13,93
82,897	142,202	206,155	203,238	265,539	18,5	19,5	5515,07	13,86
106,670	169,443	236,409	233,913	300,320	18,8	19,8	3724,96	13,78
66,248	132,550	203,583	201,732	274,077	18,7	21,3	1426,28	13,32
44,341	116,807	195,049	197,082	279,815	18,9	27,9	205,01	11,07

Tabela I.151 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 14,6 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 833 \text{ cP}, \rho = 1250 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
239,188	235,409	254,710	238,633	239,503	14,5	14,6	22435,35	16,49
203,005	206,353	230,627	215,991	223,814	14,4	14,4	20670,51	16,40
148,013	161,587	193,076	180,700	198,565	14,4	14,7	18454,95	16,05

106,652	127,231	163,858	153,062	178,141	14,4	14,8	16516,37	15,79
83,369	109,155	149,399	139,693	169,818	14,6	14,9	15011,91	15,52
109,428	140,160	183,861	175,338	210,246	14,5	15,0	13460,50	15,31
141,833	181,388	232,132	223,932	266,769	14,5	14,9	10164,25	15,25
32,610	77,488	131,870	124,661	172,613	14,5	14,6	8029,86	15,06
54,453	105,368	164,162	158,356	212,397	14,6	14,8	6076,82	14,94
88,713	145,483	209,080	203,790	264,107	15,2	14,3	3084,35	15,21
126,560	189,274	258,221	254,143	322,998	15,3	16,2	1114,55	14,85
73,325	143,573	218,758	219,272	296,907	15,6	22,3	210,56	12,39

Tabela I.152 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 11,8 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 1058 \text{ cP}, \rho = 1252 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
246,261	241,018	261,503	244,729	247,006	11,6	11,8	19804,06	17,02
228,265	228,443	251,940	236,044	242,461	11,7	11,8	18895,50	16,89
189,050	194,163	221,175	206,272	217,568	11,8	12,0	17950,85	16,68
173,732	183,292	213,175	199,339	214,784	11,8	12,1	16945,73	16,54
139,490	157,391	193,301	181,044	204,614	11,8	12,0	14451,23	16,29
90,803	114,125	153,496	142,342	170,888	12,0	12,2	13152,31	15,95
92,429	121,030	164,446	154,162	187,898	11,6	11,7	11109,42	15,83
55,733	92,293	141,197	132,359	173,573	11,8	11,7	8872,32	15,45
84,226	126,998	180,468	171,893	217,923	11,7	12,5	7221,95	15,50
81,993	127,771	183,661	175,358	224,506	11,8	11,9	5800,57	15,62
103,965	153,414	211,933	204,366	257,191	11,9	12,2	4708,78	15,62
83,523	137,787	200,142	193,669	251,801	12,2	12,3	2933,94	15,64
98,067	159,379	227,686	222,752	290,440	11,9	14,6	1017,49	15,22
78,698	147,368	221,740	221,112	297,597	12,5	19,1	205,71	13,05

Tabela I.153 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 49,9 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 77 \text{ cP}, \rho = 1227 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
216,051	212,636	233,942	216,322	216,869	49,9	50,1	49385,30	12,66
178,398	181,249	208,168	192,462	200,460	50,0	50,1	47852,19	12,74
107,124	120,775	157,222	144,776	166,220	50,0	50,1	44961,49	12,85
53,574	75,797	119,097	108,793	140,467	50,0	50,1	42731,95	12,91
27,881	58,004	107,771	99,223	140,389	49,9	50,1	40593,94	12,95
38,205	84,096	142,804	136,433	189,426	49,9	50,1	37416,71	13,10
62,377	119,567	186,427	181,370	244,289	49,9	50,1	34455,94	13,10
70,332	137,173	212,293	208,027	280,960	49,9	50,0	31154,26	12,95
84,120	158,018	245,227	239,064	322,021	49,9	50,0	27247,18	13,06
45,794	125,827	217,117	213,086	302,468	49,8	50,1	24369,59	12,81
50,575	140,848	238,160	238,806	337,954	49,8	50,1	20474,70	12,60
74,195	172,112	274,152	278,734	385,408	49,8	50,1	17748,41	12,53
46,937	152,005	257,136	265,256	377,266	49,9	50,2	15243,98	12,40

55,786	166,253	275,011	285,749	402,774	49,9	50,3	12562,72	12,27
61,554	173,928	285,927	297,171	417,525	49,8	50,3	10276,35	12,11
44,464	158,179	272,355	283,585	408,235	49,8	50,3	7600,27	11,89
25,066	141,012	259,426	269,453	399,922	49,7	50,7	5086,91	11,82
26,788	145,992	270,653	278,935	415,027	49,7	51,3	2487,19	11,78
44,314	167,737	296,317	301,995	441,732	50,9	53,4	118,71	11,40

Tabela I.154 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 41,3 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 115 \text{ cP}, \rho = 1233 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
230,754	229,266	249,463	232,454	231,312	41,1	41,4	46591,42	13,95
190,980	198,389	225,249	210,339	218,522	41,2	41,4	44871,31	14,09
149,420	167,762	203,180	190,862	211,193	41,3	41,4	42459,83	14,23
155,465	182,422	224,401	213,945	244,437	41,3	41,4	40440,21	14,32
77,370	115,560	166,249	157,969	200,783	41,3	41,4	37706,42	14,36
113,794	164,415	225,854	219,769	275,009	41,3	41,4	34183,28	14,30
40,258	98,098	166,748	160,622	225,037	41,3	41,4	31791,54	14,17
45,231	111,727	187,101	181,373	252,494	41,3	41,4	29597,84	14,29
54,689	127,556	210,254	205,163	283,361	41,3	41,5	27055,51	14,35
43,811	121,165	207,107	203,666	286,742	41,3	41,5	25231,60	14,22
78,970	167,386	258,569	258,642	350,866	41,3	41,5	21298,20	13,97
60,821	155,995	252,434	255,233	354,688	41,3	41,6	18460,74	13,77
84,838	186,094	286,129	292,973	398,594	41,3	41,6	15934,86	13,61
32,200	138,149	241,147	250,070	361,260	41,3	41,6	13532,31	13,36
51,264	160,674	267,908	278,184	394,820	41,3	41,7	11028,57	13,21
38,032	150,377	261,340	272,141	395,130	41,2	41,9	7393,41	12,88
43,100	157,039	271,723	281,700	409,602	41,2	42,2	5158,14	12,78
45,269	163,184	284,980	293,365	427,543	41,1	42,8	2537,98	12,80
36,761	159,735	286,137	292,315	430,793	43,2	45,4	147,97	12,21

Tabela I.155 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 33,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 188 \text{ cP}, \rho = 1238 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
247,968	246,298	267,254	249,120	248,435	33,4	33,6	43688,80	15,60
212,842	219,009	245,859	229,365	236,880	33,6	33,7	42294,73	15,70
205,406	226,183	264,430	250,345	274,253	33,7	33,9	39417,81	15,91
162,781	193,847	240,619	228,896	264,064	33,9	34,1	37077,23	15,94
128,038	166,936	220,089	209,800	252,678	33,6	33,7	34918,50	16,00
137,453	184,052	243,818	234,865	285,866	33,6	33,7	32711,60	15,95
64,785	118,405	185,466	176,700	235,955	33,7	33,9	30408,53	15,70
65,591	126,144	201,809	193,100	261,389	33,8	33,9	27483,87	15,44
91,371	161,238	244,502	236,597	311,879	33,8	34,0	25016,95	15,63
69,114	144,823	231,658	225,049	306,044	33,2	33,5	22802,84	15,58
67,723	152,509	243,459	241,725	330,878	33,3	33,6	20016,99	15,39

79,640	172,740	268,816	271,395	369,201	33,4	33,7	16565,06	15,03
93,380	192,369	291,328	295,938	398,926	33,4	33,7	13776,86	14,70
96,760	200,806	304,775	311,007	421,143	33,4	33,8	11189,52	14,53
98,815	205,288	311,559	318,762	432,881	33,4	33,9	9483,59	14,40
18,523	127,009	235,722	243,561	362,646	33,4	34,0	7642,31	14,16
17,077	129,138	243,538	251,437	377,017	33,4	34,5	4983,92	14,03
27,671	141,514	262,596	269,497	400,589	33,4	35,5	2423,97	13,91
44,308	165,483	290,586	296,891	434,198	35,4	39,1	211,33	13,03

Tabela I.156 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 250 \text{ cP}, \rho = 1240 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
258,765	259,433	281,511	262,200	258,921	29,4	29,6	41930,88	16,76
227,464	238,341	268,507	251,318	259,732	29,2	29,4	39827,46	16,99
211,562	234,017	273,452	258,747	279,679	29,4	29,5	37460,02	17,11
240,489	275,875	326,378	314,247	350,721	29,2	29,4	34074,18	17,15
183,981	225,921	282,171	271,015	314,363	29,6	29,7	32484,00	16,96
105,792	155,499	219,352	208,877	261,985	29,7	29,9	30037,10	16,67
111,809	168,502	240,039	229,735	292,212	29,7	29,9	27395,48	16,43
75,755	138,033	215,505	206,101	274,627	29,5	29,6	25028,16	16,24
59,258	130,565	214,418	205,830	281,270	29,6	29,8	22931,93	16,45
54,210	136,088	225,410	221,591	307,062	29,6	29,7	19777,75	16,27
93,100	183,003	278,187	277,755	372,842	29,6	29,8	16089,06	15,91
62,874	158,635	256,174	258,232	357,060	29,6	29,8	13810,58	15,63
73,037	175,880	278,697	282,813	390,993	29,6	29,9	10536,02	15,41
32,007	139,608	248,552	254,675	372,437	29,6	30,2	6980,53	15,02
57,141	169,833	284,896	291,490	415,899	29,7	31,0	3969,70	14,82
33,847	146,360	265,938	271,891	400,916	29,7	32,0	2309,15	14,58
25,330	146,348	271,225	277,580	414,806	35,1	39,0	191,02	12,98

Tabela I.157 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 25,0 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 355 \text{ cP}, \rho = 1243 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
282,702	282,153	306,185	286,126	283,123	25,0	25,1	39561,88	18,12
260,587	268,432	299,038	281,007	287,316	25,0	25,1	37892,77	18,24
189,545	209,284	248,598	232,846	251,070	25,0	25,1	35597,00	18,16
156,826	188,059	236,715	223,533	254,930	25,0	25,1	32843,80	18,09
118,953	159,189	215,248	203,240	244,904	24,9	25,0	30345,24	17,98
116,116	165,248	230,148	219,107	271,663	24,9	25,1	27563,69	17,68
115,570	170,339	241,324	230,780	290,671	24,9	25,1	25516,43	17,42
117,328	180,781	258,778	250,696	319,852	25,0	25,1	22692,16	17,13
140,245	216,491	303,196	296,920	376,511	25,0	25,2	19489,62	17,35
163,824	248,804	340,122	337,495	426,628	25,0	25,3	16353,66	17,09
107,034	196,344	291,819	289,907	384,238	25,0	25,3	14242,57	16,85

93,611	189,863	288,705	287,349	387,586	25,0	25,4	11701,60	16,60
96,105	195,665	300,134	300,865	407,107	25,1	25,7	9280,02	16,49
103,077	204,411	314,456	315,093	427,829	25,0	25,9	7203,78	16,37
102,431	211,863	321,220	322,779	440,487	25,0	26,3	5009,11	16,17
50,632	160,848	274,928	278,776	402,750	25,1	27,4	2686,66	15,74
31,149	149,879	275,601	280,929	417,563	26,2	33,6	223,38	13,82

Tabela I.158 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 21,4 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 472 \text{ cP}, \rho = 1245 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
309,150	307,464	331,112	310,112	309,131	21,5	21,8	37057,16	19,30
260,508	267,629	298,021	278,966	287,285	21,6	21,9	35461,25	19,28
182,748	203,424	244,041	227,671	249,876	21,3	21,6	32565,28	19,28
123,511	153,933	202,424	188,083	221,053	21,4	21,6	30331,29	19,08
59,590	100,017	157,243	144,502	188,778	21,4	21,7	27722,64	18,74
8,552	57,263	122,213	110,910	165,052	21,5	21,8	25239,69	18,44
43,290	101,776	174,528	165,591	229,923	21,3	21,6	22316,61	18,11
80,021	149,450	230,666	222,970	296,852	21,5	21,7	19406,98	18,32
115,996	193,754	280,560	275,701	358,055	21,4	21,8	16570,78	18,08
113,522	195,757	286,244	281,953	368,836	21,5	22,0	14611,24	17,79
62,093	152,180	248,888	246,631	341,977	21,6	22,1	11622,40	17,68
62,769	159,854	259,057	257,541	358,715	21,3	22,2	9489,61	17,65
84,657	187,605	291,600	291,330	400,701	21,4	22,4	6301,31	17,50
61,942	166,698	274,776	274,664	388,384	21,4	23,0	4584,29	17,23
89,873	196,572	306,989	308,975	430,993	21,1	24,3	2127,86	16,66
74,071	190,811	315,440	321,257	455,831	21,4	29,1	218,97	14,71

Tabela I.159 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 605 \text{ cP}, \rho = 1247 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
331,947	328,963	355,387	333,096	332,366	18,5	18,8	34892,94	20,03
284,715	292,260	327,005	307,124	317,922	18,5	18,8	32659,42	20,05
251,609	270,446	313,807	296,156	318,678	18,3	18,5	30175,73	19,99
145,473	178,649	232,402	217,493	254,290	18,5	18,7	27339,34	19,57
116,935	157,587	217,766	204,431	249,645	18,5	18,7	25332,43	19,37
95,237	147,818	217,525	207,308	265,117	18,5	18,8	22124,63	18,97
100,885	162,564	237,741	230,389	297,546	18,5	18,8	19661,83	18,77
104,679	175,664	258,921	251,408	326,574	18,5	18,9	16602,19	18,80
132,452	209,904	298,170	292,174	374,289	18,5	18,9	13996,55	18,53
71,136	154,001	246,091	241,663	329,583	18,4	18,9	12235,59	18,43
81,395	172,784	270,754	267,885	363,913	17,8	19,0	9183,70	18,51
81,851	178,627	280,836	279,132	381,528	18,4	19,6	6959,83	18,31
77,346	177,883	284,013	282,002	389,301	18,4	19,1	4381,02	18,37
56,453	159,123	268,437	266,524	378,023	18,5	19,3	2317,96	18,29

49,386	165,829	290,711	296,329	430,402	18,6	28,5	218,26	14,64
--------	---------	---------	---------	---------	------	------	--------	-------

Tabela I.160 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3000 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 14,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 838 \text{ cP}, \rho = 1250 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
363,986	361,252	389,438	365,828	365,123	14,5	14,6	31202,53	21,43
353,313	355,350	387,319	364,864	369,486	14,4	14,6	30205,06	21,40
294,417	306,778	346,405	326,191	341,588	14,4	14,6	28256,06	21,19
211,396	235,201	283,009	265,144	291,608	14,5	14,7	26079,62	20,92
154,034	185,835	239,808	223,871	258,986	14,5	14,8	24238,31	20,71
90,116	130,930	191,804	178,121	222,983	14,5	14,7	21939,09	20,42
88,723	136,634	202,591	190,478	242,672	14,5	14,7	20082,28	20,18
99,536	154,897	226,019	215,844	275,666	14,4	14,8	18072,38	19,87
61,366	123,342	199,486	190,977	257,831	14,6	15,0	16143,31	19,48
105,921	173,544	255,025	245,309	316,814	14,7	15,2	14152,92	19,57
110,577	185,455	272,071	263,957	342,810	14,5	14,7	11468,74	19,54
82,440	162,534	252,816	246,071	330,089	14,7	14,9	10124,41	19,40
121,779	207,089	301,149	295,189	384,465	14,5	14,6	7892,34	19,49
73,636	164,290	262,472	257,691	352,983	14,4	15,1	6303,51	19,30
85,110	182,032	285,392	281,528	384,044	14,8	15,9	4255,23	19,10
83,016	185,551	295,012	292,404	404,259	14,8	18,2	1882,66	18,55
64,506	178,392	300,866	305,360	434,829	14,8	23,8	199,11	15,68

Tabela I.161 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 76 \text{ cP}, \rho = 1227 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
289,104	277,501	308,834	285,958	289,856	50,0	50,2	58442,64	16,56
187,565	194,273	238,913	220,658	242,367	50,0	50,3	55206,70	16,77
136,941	156,720	211,266	196,208	232,041	50,1	50,3	52578,88	16,89
83,149	115,106	178,738	166,304	214,977	50,2	50,4	50000,20	16,95
102,069	144,310	216,014	205,604	265,954	50,1	50,3	47571,40	17,15
52,832	111,711	191,249	182,741	253,367	50,0	50,2	45165,96	17,25
74,118	142,762	229,934	222,894	302,795	49,9	50,0	42756,96	17,22
60,553	139,750	234,758	228,925	318,371	50,0	50,1	40221,26	17,10
48,475	137,325	239,625	234,552	333,019	50,0	50,2	37660,04	16,96
57,370	151,802	265,896	256,887	364,718	50,0	50,3	34935,62	17,11
77,228	177,295	297,222	288,802	402,847	50,1	50,3	32728,75	17,01
63,351	170,073	294,943	288,213	408,850	50,1	50,4	30298,92	16,78
87,602	204,136	334,421	331,773	461,126	49,9	50,1	26900,56	16,58
93,795	217,911	352,550	353,250	489,340	49,9	50,2	24597,60	16,49
39,730	170,302	308,830	312,801	454,941	50,0	50,3	22681,47	16,31
50,993	189,107	331,104	338,883	487,902	50,0	50,3	20368,70	16,19
75,740	222,687	368,488	380,738	536,795	50,0	50,5	17558,42	16,12
65,469	218,006	367,274	382,496	543,841	50,1	50,6	15433,11	16,03

55,003	210,778	365,413	381,525	547,777	50,0	50,7	12583,17	15,82
72,359	229,430	387,805	403,818	574,810	50,0	50,8	9833,79	15,60
68,539	228,775	392,469	407,433	584,592	50,0	51,1	7044,59	15,50
18,131	180,567	348,337	362,175	543,937	50,0	51,2	5490,55	15,41
35,430	202,379	376,774	387,838	576,369	50,0	52,6	2536,27	15,25
14,221	185,827	365,112	372,480	566,049	52,1	56,0	121,06	14,67

Tabela I.162 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 41,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 114 \text{ cP}, \rho = 1232 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
304,436	302,474	323,147	301,795	304,646	41,5	41,7	55161,26	17,53
218,930	232,692	265,329	247,872	266,031	41,5	41,9	52609,02	17,76
142,065	168,334	211,850	197,033	229,444	41,6	41,9	50196,02	17,91
198,052	235,452	288,927	276,519	322,573	41,4	41,6	47311,34	18,23
162,783	211,058	274,086	263,854	322,934	41,4	41,6	44874,46	18,36
203,832	265,612	340,655	333,073	404,515	41,4	41,6	41668,49	18,38
132,219	202,167	284,143	277,438	357,471	41,4	41,6	39614,81	18,33
91,197	176,118	266,593	260,329	350,041	41,5	41,9	37219,05	18,48
111,699	201,569	301,463	292,702	391,562	41,6	42,0	35131,37	18,56
122,347	218,650	326,029	318,253	424,237	41,5	41,8	32559,90	18,59
103,122	205,730	319,368	313,426	426,021	41,4	41,7	30513,21	18,41
51,741	165,641	286,399	284,424	407,349	41,3	41,6	27032,62	18,01
67,256	187,035	310,464	310,361	437,613	41,4	41,7	25327,98	17,87
70,688	196,207	322,635	324,605	457,326	41,4	41,7	23362,73	17,70
102,316	237,302	371,045	377,307	521,048	41,4	41,8	20120,79	17,60
118,890	260,390	398,193	408,863	558,185	41,4	41,8	17932,75	17,37
120,715	268,737	410,593	424,208	579,927	41,4	41,9	15412,22	17,11
109,502	260,884	406,584	421,277	581,913	41,4	42,0	13303,62	16,92
79,425	231,096	377,551	392,541	553,827	41,4	42,0	13019,41	16,88
85,014	238,975	388,035	403,687	569,523	41,4	42,1	10935,46	16,71
37,689	194,419	348,633	363,539	536,891	41,5	42,4	7120,53	16,31
39,915	200,400	361,849	375,185	556,653	41,5	43,0	4537,85	16,31
41,570	205,609	370,537	382,822	568,425	41,4	43,8	2712,62	16,21
16,583	187,442	359,905	368,444	559,567	44,1	47,1	92,19	15,36

Tabela I.163 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 33,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 188 \text{ cP}, \rho = 1238 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
330,400	327,214	354,795	331,478	330,536	33,4	33,7	52231,20	19,40
252,253	261,793	300,100	279,763	294,018	33,5	33,7	50001,85	19,57
202,523	227,861	278,066	260,564	291,762	33,5	33,7	47309,66	19,87
129,145	166,723	225,715	210,364	254,838	33,5	33,7	45158,16	20,04
118,813	169,087	238,706	225,745	283,506	33,4	33,7	42570,30	20,18
47,067	108,922	187,736	177,303	244,890	33,4	33,7	40032,17	20,13



35,272	105,966	192,358	182,595	260,219	33,4	33,7	37706,79	20,09
61,808	141,154	237,804	228,108	316,813	33,4	33,6	34847,28	19,99
82,969	168,016	271,585	261,444	357,577	33,5	33,7	32711,65	19,84
110,721	206,907	319,657	309,513	414,167	33,5	33,7	30179,79	20,10
62,541	168,215	286,198	279,185	393,029	33,5	33,7	27549,04	19,78
88,092	202,635	324,756	322,232	443,909	33,5	33,8	25056,83	19,59
93,322	217,495	344,461	346,437	476,094	33,5	33,8	22404,69	19,33
100,510	230,271	361,070	366,583	502,782	33,5	33,9	20235,89	19,05
92,298	229,158	363,805	372,438	515,899	33,5	34,0	17312,05	18,62
114,816	256,328	394,997	405,252	554,435	33,6	34,0	15236,13	18,40
65,563	212,301	356,503	369,033	526,486	33,6	34,2	12488,50	18,15
88,570	238,299	386,019	399,462	562,466	33,5	34,3	10131,05	17,90
62,512	215,234	368,498	381,994	551,653	33,6	34,6	7536,37	17,67
65,129	220,623	381,204	393,761	571,065	33,4	35,1	4961,64	17,62
12,046	170,393	337,077	347,927	530,671	33,4	36,2	2993,33	17,54
21,022	188,857	362,243	371,416	561,593	37,3	40,6	213,82	16,31

Tabela I.164 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 29,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 251 \text{ cP}, \rho = 1240 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
349,548	349,270	376,772	351,599	349,399	29,6	29,8	50484,17	20,47
257,809	274,070	315,706	293,619	310,872	29,4	29,7	47488,48	20,88
206,811	235,353	287,142	267,752	300,083	29,5	29,7	45203,86	21,10
147,229	189,548	251,957	235,766	281,830	29,5	29,7	42664,81	21,27
121,370	173,946	244,643	230,458	286,484	29,4	29,6	40488,08	21,32
92,077	156,472	237,840	225,169	293,874	29,4	29,6	37566,42	21,21
102,677	174,972	264,846	252,214	331,408	29,4	29,7	35189,89	21,05
89,518	170,484	270,479	258,132	348,268	29,4	29,7	32217,65	20,80
116,555	207,782	317,224	305,555	404,060	29,4	29,7	29864,66	21,02
66,247	166,505	281,724	271,308	377,921	29,4	29,7	27427,99	20,75
92,485	200,768	321,084	314,632	429,509	29,4	29,7	25029,06	20,60
52,845	171,022	295,458	293,930	417,780	29,4	29,8	22608,40	20,39
79,236	203,552	332,523	334,854	466,179	29,5	29,8	20024,04	20,04
78,687	209,385	341,813	345,946	481,991	29,5	29,9	17679,19	19,68
48,552	185,760	322,213	329,137	472,613	29,5	30,0	14952,05	19,31
72,212	214,998	357,399	365,864	518,084	29,5	30,0	12447,76	19,11
37,065	183,139	329,559	339,439	497,642	29,4	30,1	10392,88	18,85
62,013	212,938	365,234	376,217	543,430	29,7	30,8	7461,08	18,54
78,198	232,808	393,916	404,307	579,950	29,7	31,7	4251,18	18,34
31,485	187,555	354,160	363,774	545,593	29,7	33,1	2382,99	18,16
24,474	191,775	365,091	374,231	564,228	36,0	40,0	201,83	16,44

Tabela I.165 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 352 \text{ cP}, \rho = 1243 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
371,535	371,683	402,441	375,984	372,010	25,0	25,2	47826,21	22,03
285,237	300,438	343,327	320,388	333,010	25,1	25,3	45377,84	22,22
188,017	220,056	275,833	256,445	287,022	25,1	25,4	42468,43	22,33
129,525	172,391	236,790	219,319	261,806	25,0	25,2	40249,23	22,41
79,757	134,862	209,923	194,487	251,190	25,0	25,1	37395,59	22,35
65,102	129,049	212,194	197,718	264,870	25,0	25,2	35224,47	22,16
97,096	169,528	261,425	247,466	325,551	25,0	25,3	32664,38	21,95
111,705	191,739	292,483	279,067	366,391	25,0	25,3	30117,38	21,73
88,157	184,445	297,787	286,286	387,579	25,1	25,3	26433,70	21,76
107,224	208,999	325,500	315,602	422,095	25,0	25,2	24909,88	21,67
139,262	250,356	372,393	367,099	483,012	25,0	25,3	22431,44	21,54
80,916	198,839	324,560	322,180	446,089	25,1	25,4	20077,18	21,15
84,773	209,559	340,633	341,297	471,286	25,1	25,5	17526,27	20,89
97,999	230,102	366,003	369,335	505,766	25,1	25,6	14948,07	20,58
82,095	219,194	360,167	363,060	508,063	25,2	25,8	12621,66	20,37
102,554	243,679	390,140	393,903	547,988	25,1	26,1	10126,50	20,12
73,314	218,765	368,560	374,937	536,770	25,1	26,2	7742,23	19,84
18,739	170,388	322,763	331,179	497,629	24,8	26,6	5545,03	19,65
44,812	197,497	359,342	366,966	541,553	25,2	28,2	2635,39	19,06
21,996	187,305	359,155	368,443	556,591	26,2	33,2	192,75	17,41

Tabela I.166 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 471 \text{ cP}, \rho = 1245 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
405,574	405,256	436,917	409,532	405,813	21,5	21,7	45273,18	23,28
287,471	306,131	352,785	329,504	346,551	21,5	21,8	42080,13	23,44
224,269	254,219	309,708	288,744	318,269	21,5	21,7	40036,94	23,51
158,139	201,011	266,764	248,331	291,746	21,5	21,8	37559,75	23,41
82,028	135,286	209,930	193,202	248,626	21,5	21,7	35191,63	23,23
53,836	116,895	200,712	185,244	252,444	21,5	21,8	32767,45	22,97
86,260	158,294	251,012	236,529	314,528	21,5	21,8	30266,63	22,71
78,318	159,851	261,125	249,175	337,921	21,4	21,7	27547,14	22,48
74,588	167,578	276,642	268,186	369,396	21,4	21,8	24674,77	22,23
76,900	181,182	298,656	290,761	400,147	21,4	21,9	22281,77	22,44
69,909	179,888	300,571	295,027	410,032	21,4	21,9	20662,27	22,28
66,401	186,891	314,478	312,723	438,475	21,6	22,1	16816,96	21,70
53,871	180,330	314,723	312,186	445,249	21,5	22,3	14302,17	21,44
40,959	172,275	309,357	307,994	446,293	21,5	22,3	12679,47	21,35
39,144	175,839	318,647	319,657	465,851	21,4	22,4	10077,78	21,37
76,478	222,742	370,451	367,437	527,158	21,3	22,8	6905,21	21,11
35,666	183,118	334,042	336,033	497,168	21,3	23,3	5461,58	20,84
44,391	193,897	348,517	353,374	524,773	21,2	24,9	2564,67	20,05

18,008	182,084	353,632	362,571	549,802	21,5	30,5	170,73	17,86
--------	---------	---------	---------	---------	------	------	--------	-------

Tabela I.167 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 600 \text{ cP}, \rho = 1247 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
438,458	436,012	469,930	441,023	438,952	18,4	18,7	42564,42	24,58
369,063	377,635	419,451	393,056	402,913	18,5	18,7	40765,55	24,63
302,346	321,641	371,760	347,786	369,334	18,5	18,7	38937,71	24,65
246,291	273,917	330,389	308,126	338,502	18,5	18,8	37494,74	24,61
163,461	203,863	270,186	250,510	294,111	18,5	18,8	35134,40	24,46
106,533	157,945	233,772	215,975	272,223	18,5	18,8	32705,23	24,15
69,741	130,277	214,359	198,183	264,983	18,5	18,8	30461,80	23,89
59,158	132,409	226,963	213,725	294,679	18,4	18,7	27284,82	23,54
92,147	175,162	276,617	266,228	356,736	18,4	18,8	25006,52	23,34
94,479	188,814	297,736	291,467	393,471	18,5	19,0	22216,72	23,10
98,936	202,172	319,046	311,692	420,904	18,6	19,1	19823,26	23,24
99,671	212,957	337,611	332,264	452,187	18,5	19,1	16219,77	22,67
48,891	167,777	296,814	293,519	419,855	18,5	19,2	14448,31	22,59
59,033	186,097	320,842	317,541	451,007	18,4	19,4	12325,33	22,61
71,567	205,172	345,734	339,982	483,472	18,7	19,5	9960,34	22,50
77,496	217,264	360,763	360,280	508,812	18,3	19,9	7318,72	22,22
89,754	233,197	382,382	382,383	538,173	18,3	20,5	4940,42	21,76
56,665	203,224	354,680	358,255	526,073	19,1	22,4	2423,33	20,94
32,078	195,106	366,873	375,742	561,694	19,1	28,6	179,64	18,28

Tabela I.168 – Teste de desempenho monofásico viscoso com glicerina,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,

$$T_e = 14,6 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 836 \text{ cP}, \rho = 1250 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
480,757	479,149	514,481	483,593	482,145	14,7	15,1	39129,83	26,06
393,758	404,377	449,632	421,612	434,054	14,6	15,0	36972,05	26,01
322,097	342,499	395,729	370,036	393,623	14,6	14,9	35089,67	25,91
213,265	248,819	314,082	291,563	331,575	14,6	14,8	32141,02	25,58
142,633	188,058	261,101	240,659	291,201	14,5	14,7	29988,73	25,43
59,724	116,565	198,615	180,770	243,491	14,5	14,8	27801,97	25,07
59,706	116,455	198,579	180,735	243,437	14,5	14,8	27796,97	25,06
108,153	176,562	267,459	252,831	328,043	14,5	14,7	24945,70	24,94
49,200	127,876	225,983	214,229	299,955	14,4	14,9	22772,11	24,64
76,737	164,012	268,403	259,096	353,694	14,6	14,8	20350,06	24,36
92,700	189,582	302,871	291,871	394,428	14,4	15,2	17599,32	24,12
101,474	208,932	329,465	321,311	434,681	14,6	15,4	14798,48	23,88
40,864	159,049	287,192	281,998	406,261	14,6	16,2	12558,45	23,54
47,697	173,573	307,304	303,449	435,190	14,5	16,4	10063,60	23,51
96,214	225,928	363,697	359,539	496,483	14,5	14,8	6715,95	23,91
115,509	253,607	399,574	396,487	545,036	14,3	16,0	3930,91	23,48

70,603	214,227	365,452	364,755	522,703	15,4	19,0	2280,07	22,36
31,533	193,306	364,611	373,113	558,538	15,7	26,3	168,70	18,78

Tabela I.169 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 1800 \text{ rpm}, T_e = 10,0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \mu = 33 \text{ cP}, \rho = 1177 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^{\circ}.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
57,466	55,785	63,010	55,186	57,495	10,0	10,0	29806,76	4,09
48,639	53,427	66,205	60,203	68,921	10,1	10,2	27228,26	4,19
78,906	87,630	103,453	98,504	111,114	10,0	10,2	25493,40	4,25
116,714	130,581	150,292	146,413	164,760	10,0	10,1	23056,15	4,23
73,087	91,394	115,177	112,158	136,111	10,0	10,1	20394,91	4,07
110,670	135,231	164,951	161,035	189,836	10,1	10,2	17173,74	4,16
136,568	164,000	197,004	193,845	226,036	10,0	10,0	14399,45	4,12
55,514	86,709	121,872	120,718	157,868	9,9	9,9	11718,01	3,96
67,400	101,799	138,262	138,540	177,728	9,9	9,9	9909,48	4,02
76,549	113,335	151,155	152,872	194,126	9,9	9,9	8159,08	4,01
83,206	121,703	161,118	163,450	206,496	9,9	10,0	6267,24	3,96
87,148	126,354	167,534	169,705	214,412	10,0	10,0	4206,31	3,90
87,712	128,351	171,659	173,293	220,237	10,0	10,2	2376,51	3,90
87,866	130,160	174,922	175,458	224,389	10,1	10,7	317,73	3,83

Tabela I.170 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 1800 \text{ rpm}, T_e = 29,9 \text{ }^{\circ}\text{C}, \mu = 12 \text{ cP}, \rho = 1166 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^{\circ}.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{elxo}$ [N.m]
58,797	57,056	64,476	55,683	59,552	29,8	29,7	32270,08	3,55
44,046	49,962	61,364	54,310	63,288	29,8	29,8	30504,27	3,71
33,633	48,402	67,507	62,988	81,093	29,8	29,8	26284,85	3,79
64,016	81,631	103,477	99,326	120,581	29,8	29,8	24450,90	3,75
102,817	124,315	149,387	145,847	171,087	29,9	29,8	21867,74	3,69
70,878	96,618	127,910	123,194	153,633	29,9	29,8	18585,51	3,67
78,826	106,609	140,619	136,047	169,115	29,9	29,9	16358,49	3,67
89,595	120,816	156,997	154,060	189,772	29,9	29,9	13454,84	3,57
54,606	89,259	126,230	125,535	164,312	29,9	29,9	11176,88	3,49
43,144	80,262	117,950	118,636	159,404	29,9	29,9	9667,31	3,49
54,258	94,242	133,521	135,837	179,391	29,8	29,9	7358,61	3,49
61,920	103,585	146,031	147,884	194,648	29,8	30,0	4126,61	3,44
47,547	90,182	135,499	136,545	185,225	29,8	30,0	2348,48	3,43
46,672	91,256	137,617	137,229	187,805	29,7	30,3	317,03	3,39

Tabela I.171 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 2400 \text{ rpm}, T_e = 9,9^\circ\text{C}, \mu = 34 \text{ cP}, \rho = 1177 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
265,536	262,989	276,603	264,014	266,612	10,0	10,2	40800,33	7,18
208,343	214,446	235,114	225,084	236,850	10,0	10,2	38258,30	7,28
147,881	163,035	190,774	183,019	204,518	10,0	10,2	35278,43	7,31
108,036	128,958	161,075	154,774	182,715	10,0	10,2	33118,16	7,26
134,757	161,734	198,819	193,632	228,324	9,9	10,0	30571,62	7,26
164,653	198,425	241,434	237,406	279,351	9,9	10,0	27556,24	7,12
221,152	264,151	316,531	310,718	360,481	9,9	10,0	23932,07	7,21
154,678	200,306	256,842	251,103	304,916	10,0	10,1	21847,15	7,14
111,423	159,127	217,660	212,705	269,117	9,9	10,0	20363,16	7,04
146,898	199,946	261,960	259,569	320,807	9,8	9,9	17262,90	6,96
90,559	146,751	210,109	209,280	273,470	9,8	9,9	15738,46	6,88
111,965	173,551	238,906	241,001	309,448	9,8	9,9	13340,79	6,88
127,251	193,268	260,545	265,123	337,467	9,7	9,9	11064,66	6,90
113,308	182,340	253,606	258,902	336,037	9,7	9,9	8046,12	6,80

Tabela I.172 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 2400 \text{ rpm}, T_e = 30,0^\circ\text{C}, \mu = 12 \text{ cP}, \rho = 1166 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
90,433	90,748	103,519	89,007	92,422	30,0	29,9	43745,04	6,23
100,070	102,185	115,969	101,870	106,466	30,0	30,0	43407,66	6,29
50,155	65,633	88,720	78,356	95,356	30,0	30,0	40336,09	6,54
22,450	48,904	80,675	73,664	102,337	30,0	30,0	36800,15	6,68
26,142	57,571	94,665	88,645	124,099	30,0	30,0	34224,58	6,67
77,587	112,859	154,426	149,149	189,819	30,0	30,0	31644,65	6,60
142,962	183,962	230,964	226,258	272,921	30,0	30,0	28104,69	6,57
66,200	111,477	167,854	161,091	214,811	30,0	30,0	24564,73	6,48
112,436	161,745	223,012	216,544	274,689	30,0	30,0	21289,84	6,47
82,475	137,305	201,622	198,422	260,931	30,0	30,0	17677,40	6,23
90,039	153,319	219,807	221,554	290,886	30,0	30,0	13546,54	6,19
105,384	173,089	241,119	245,723	318,292	30,0	30,0	11197,65	6,25
52,885	123,420	195,545	200,566	279,409	29,9	30,0	7741,59	6,09
31,178	103,964	179,126	183,947	266,018	29,9	30,1	5019,33	5,98
35,006	109,132	188,686	191,754	277,151	29,9	30,2	2989,77	5,94
35,239	112,287	194,032	194,683	282,951	30,0	30,9	333,49	5,87

Tabela I.173 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 3000 \text{ rpm}, T_e = 9,8^\circ\text{C}, \mu = 34 \text{ cP}, \rho = 1177 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
127,377	122,564	142,751	123,524	127,915	10,0	10,2	51895,59	10,65
133,743	140,808	172,055	156,930	175,470	10,0	10,1	48997,87	10,91
80,563	98,406	138,973	127,094	157,756	9,9	10,0	45970,78	11,05
157,831	189,063	239,348	230,078	272,790	9,9	10,0	42394,65	11,15
222,880	261,544	317,623	309,710	360,338	9,9	10,0	39992,27	11,19
151,813	203,926	265,465	258,859	317,789	9,8	9,9	37525,83	11,15
102,699	160,683	227,023	221,349	286,740	9,9	9,9	35460,82	10,95
167,446	232,639	306,067	300,994	373,567	9,8	9,9	32645,77	10,87
251,613	323,062	410,830	402,407	485,305	9,7	9,9	28236,75	11,06
281,630	360,872	457,321	452,425	546,017	9,6	9,7	22988,31	10,74
222,810	309,701	409,442	408,675	508,597	9,6	9,7	19891,03	10,52
253,741	349,516	452,141	456,137	562,751	9,6	9,8	16827,46	10,52
101,014	202,133	306,895	314,109	425,688	9,6	9,8	14565,43	10,31
100,391	204,812	311,785	321,289	437,059	9,6	9,8	12706,29	10,31
70,736	178,562	291,516	301,019	423,297	9,6	9,9	9215,07	10,12
32,253	140,430	253,984	263,285	386,391	9,6	9,9	8718,30	10,07
48,660	160,392	282,515	290,165	419,685	9,7	10,2	5016,05	10,00
22,285	136,066	261,627	268,582	400,697	9,7	10,6	3258,18	9,94
25,981	144,210	271,733	274,997	412,087	10,0	12,0	335,68	9,71

Tabela I.174 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 3000 \text{ rpm}, T_e = 30,2^\circ\text{C}, \mu = 12 \text{ cP}, \rho = 1166 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
136,503	137,717	156,401	134,171	137,225	30,2	30,2	55522,67	9,57
70,160	87,639	119,657	102,683	123,311	30,3	30,3	52132,43	9,93
105,805	131,614	169,001	154,119	180,182	30,3	30,3	50911,48	10,13
205,865	245,810	294,261	283,482	323,653	30,4	30,3	47440,69	10,57
111,159	163,417	223,301	215,162	270,780	30,3	30,3	43051,60	10,51
33,994	93,955	162,081	155,207	222,945	30,3	30,3	38716,96	10,20
66,300	128,739	199,356	192,979	263,428	30,4	30,3	37279,14	10,15
36,357	102,197	184,526	175,417	254,452	30,3	30,4	33686,10	10,06
96,194	166,428	255,469	245,793	330,145	30,4	30,4	30658,62	10,12
64,218	139,686	234,790	225,471	315,915	30,3	30,3	27203,65	9,94
126,794	209,110	308,883	303,501	399,596	30,2	30,3	23187,40	9,75
43,488	130,967	232,806	231,108	331,440	30,0	30,0	20794,35	9,52
87,997	184,912	289,302	292,846	400,934	29,8	29,9	17072,41	9,50
80,839	183,633	290,164	296,783	409,459	29,8	29,9	14657,88	9,51
101,549	209,189	318,965	328,158	446,731	29,9	30,0	11876,53	9,53
45,723	155,448	268,712	277,733	400,959	29,9	30,1	9216,56	9,36
41,450	155,373	272,104	280,973	408,370	29,9	30,3	6176,41	9,27
46,959	162,139	286,279	292,351	425,525	29,9	30,6	3599,99	9,20
26,143	145,482	273,770	276,008	413,164	30,2	31,9	302,31	9,06

136,503	137,717	156,401	134,171	137,225	30,2	30,2	55522,67	9,57
---------	---------	---------	---------	---------	------	------	----------	------

Tabela I.175 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 3500 \text{ rpm}, T_e = 9,9 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 33 \text{ cP}, \rho = 1177 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
168,084	161,873	188,578	162,406	167,200	10,0	10,3	61323,85	14,10
107,122	112,124	151,497	130,101	153,250	10,2	10,4	58267,20	14,35
116,271	138,638	191,900	175,229	214,030	10,3	10,4	55326,19	14,66
60,314	90,950	154,314	140,881	193,238	10,3	10,4	52178,88	14,72
15,988	48,917	120,251	108,834	173,277	10,0	10,2	49048,48	14,59
104,290	169,568	249,229	239,530	313,887	9,9	10,0	46172,82	15,07
110,537	175,238	254,452	244,749	318,407	9,9	10,0	46346,03	15,03
52,391	124,888	210,847	202,513	285,861	9,8	10,0	43738,38	14,78
17,010	99,419	194,612	187,926	282,290	9,8	10,0	40274,66	14,46
103,411	195,269	300,119	293,179	396,531	9,7	9,9	37122,01	14,40
187,554	283,632	403,249	391,887	505,652	9,7	10,0	33465,47	14,47
85,157	186,543	313,384	303,314	424,681	9,8	10,0	30334,71	14,19
88,287	196,229	327,997	321,011	448,338	9,8	10,0	27522,28	14,01
156,036	275,871	412,585	412,263	548,756	9,8	10,0	23234,79	13,83
31,989	159,083	298,331	302,525	445,630	9,9	10,2	20700,01	13,63
99,649	243,911	390,359	404,181	562,802	9,9	10,3	14677,36	13,67
84,443	231,743	381,123	395,133	558,034	9,9	10,3	13012,68	13,61
114,988	267,717	427,594	440,266	613,018	10,0	10,6	7544,64	13,40
58,857	214,882	386,015	395,746	575,464	10,0	11,3	4026,42	13,22
26,788	186,362	361,449	365,652	552,122	11,2	15,5	420,58	12,71

Tabela I.176 – Teste de desempenho monofásico viscoso com solução de água em glicerina,

$$\omega = 3500 \text{ rpm}, T_e = 30,0 \text{ }^\circ\text{C}, \mu = 12 \text{ cP}, \rho = 1166 \text{ kg/m}^3, \theta = 0^\circ.$$

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
167,413	173,181	199,528	171,019	176,794	30,2	30,3	64144,83	13,05
97,206	118,048	160,953	139,071	169,389	30,2	30,2	60198,26	13,57
105,565	146,844	204,041	187,038	231,024	30,1	30,1	57902,44	13,97
188,471	245,746	311,921	298,017	352,997	29,9	29,9	55532,22	14,34
162,044	234,383	314,376	304,075	377,289	29,8	29,8	51119,20	14,35
167,587	250,857	343,341	334,988	425,572	29,9	29,9	45702,29	14,10
74,460	165,194	265,492	257,716	358,146	29,8	29,9	41593,20	13,68
176,764	270,589	387,929	375,760	487,229	29,9	29,9	37354,75	13,87
48,747	148,951	276,521	264,296	385,129	30,0	30,0	32884,77	13,52
132,779	241,496	375,428	366,991	494,975	30,0	30,0	28492,11	13,32
66,099	184,520	323,025	321,449	458,039	30,0	30,0	24419,83	12,94
39,157	167,084	307,956	311,542	456,140	30,0	30,1	21263,15	12,80
78,360	215,934	359,739	368,545	519,732	30,0	30,0	17944,98	12,85
107,578	251,888	398,467	412,139	569,812	30,0	30,1	14923,07	12,91
131,399	280,110	432,654	445,603	611,254	30,0	30,2	11452,45	12,83

89,852	242,448	397,793	411,077	580,885	29,9	30,3	8944,57	12,69
58,296	213,438	374,997	387,063	561,874	29,9	30,5	6065,52	12,48
25,357	184,935	356,762	363,602	546,951	29,8	31,3	2582,14	12,40
26,355	188,292	363,485	367,073	552,604	30,2	32,8	328,71	12,25

Tabela I.177 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 16900 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,242	156,653	216,833	216,208	277,186	50,1	50,4	16892,10	0,07	8,65
95,951	104,501	125,632	121,603	143,782	50,0	50,3	17683,42	0,98	6,79
104,696	109,586	121,997	118,275	131,708	50,0	50,2	16932,47	1,50	6,14
103,137	105,922	114,929	111,221	119,627	49,9	50,1	16881,26	2,03	5,30
103,546	104,769	112,529	108,911	115,568	49,9	50,0	16660,74	2,47	5,19
101,730	102,461	109,271	105,272	110,253	49,9	50,0	16793,25	3,09	5,16
102,251	102,199	108,509	103,728	107,498	49,8	49,9	16745,86	4,23	5,06
103,548	102,603	108,516	103,316	106,311	49,6	49,8	16673,10	4,94	4,98

Tabela I.178 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 21200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,946	146,439	200,489	196,239	247,938	49,8	50,0	21212,93	0,06	8,88
100,043	106,803	124,797	120,721	137,246	50,0	50,2	21493,11	1,21	6,10
99,113	105,857	123,930	119,936	137,137	49,9	50,2	21727,82	1,22	6,18
107,498	111,179	125,209	120,873	133,301	49,9	50,0	21139,70	1,81	5,77
108,394	111,138	122,544	117,817	127,036	50,2	50,3	21295,47	2,33	5,55
107,531	107,885	116,691	111,669	116,979	49,9	50,2	21321,09	3,20	5,36
102,995	101,232	107,034	101,555	102,295	49,9	50,1	21251,02	4,47	4,95

Tabela I.179 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 25400 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,667	142,089	188,079	184,351	228,216	50,1	50,3	25433,22	0,06	8,76
95,469	104,265	130,114	125,815	150,287	49,9	50,1	26354,92	0,70	7,31
103,538	110,711	130,160	125,657	141,378	49,9	50,0	25721,59	1,09	6,80
103,751	107,393	121,057	115,867	124,919	49,8	49,9	25211,39	1,63	6,27
105,308	105,816	112,830	106,841	106,991	50,0	50,1	25302,28	2,40	5,66



Tabela I.180 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8.BEP} = 16900 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
498,941	553,885	613,737	612,983	672,954	49,9	50,2	16972,01	0,06	8,85
501,405	530,384	581,572	579,502	633,642	50,0	50,3	16886,47	1,07	8,37
502,480	523,001	565,579	562,526	607,930	50,0	50,2	16883,99	1,58	7,94
503,401	518,811	551,230	547,608	582,670	50,0	50,3	16756,13	2,23	7,55
503,095	513,836	536,109	532,233	555,745	50,1	50,3	16928,09	2,95	6,95
501,228	509,904	527,511	523,835	541,424	50,1	50,3	16987,55	3,58	6,62
503,771	511,262	527,054	523,435	538,874	50,1	50,3	16805,11	4,00	6,44
502,231	508,527	522,003	518,440	530,503	50,1	50,3	16966,12	4,83	6,25
503,346	508,399	519,560	516,062	525,791	50,1	50,3	16809,03	5,49	6,16
500,918	505,246	515,752	512,216	520,969	50,1	50,3	16896,89	6,51	5,97
503,520	506,576	516,479	512,912	520,788	50,2	50,3	16843,55	7,25	5,88
502,200	504,583	513,618	509,893	516,945	50,2	50,3	16848,97	8,17	5,74
499,239	501,737	510,233	506,561	512,648	50,2	50,4	16798,74	8,63	5,68
502,726	504,260	511,684	507,928	512,809	50,3	50,4	16611,99	10,53	5,51
503,553	503,855	511,106	507,116	511,633	50,3	50,4	16683,91	12,42	5,44

Tabela I.181 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 21200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
499,667	545,442	600,472	596,359	647,921	49,8	49,9	21391,54	0,06	9,19
501,004	522,194	568,478	564,126	612,055	49,9	50,1	21272,92	0,93	8,60
500,405	515,944	555,160	550,527	592,595	50,0	50,1	21315,04	1,59	8,26
501,187	513,604	548,460	543,907	580,199	50,0	50,2	21403,22	2,13	7,96
501,219	511,359	539,997	535,402	563,401	50,0	50,3	21346,21	2,70	7,52
499,594	507,407	529,223	524,675	543,891	50,1	50,3	21790,22	3,36	6,95
503,342	510,506	529,646	525,286	542,462	50,1	50,3	21427,10	3,86	6,72
501,878	506,587	521,792	517,397	530,924	50,4	50,5	21456,27	5,02	6,58
501,391	505,662	519,943	515,588	527,872	50,5	50,5	21278,27	5,66	6,54
499,553	502,903	514,764	510,542	520,040	50,6	50,6	21509,64	6,54	5,87

Tabela I.182 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2.BEP} = 25400 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,003	541,640	587,920	584,078	627,439	50,1	50,3	25413,38	0,07	9,02
500,367	520,004	558,212	554,570	590,834	50,6	50,6	25562,43	1,32	8,21
501,934	518,443	552,248	548,423	580,480	50,6	50,7	25423,63	1,75	7,90
496,446	507,171	533,016	529,313	553,853	50,8	50,9	25101,05	2,46	7,35
503,247	512,188	532,944	528,717	544,425	50,9	51,0	25211,48	3,05	6,84

502,335	509,064	524,710	519,975	530,720	50,9	51,0	25280,09	3,73	6,47
502,558	507,104	519,682	514,567	521,523	50,9	51,1	25374,46	4,75	6,18
498,395	501,626	511,782	506,079	510,122	50,9	51,1	25803,57	5,58	6,16
501,792	503,550	511,398	505,477	506,991	50,9	51,1	25476,25	6,78	5,85
498,715	499,314	505,824	499,476	498,687	51,0	51,1	25818,41	7,73	5,83
501,003	541,640	587,920	584,078	627,439	50,1	50,3	25413,38	0,07	9,02

Tabela I.183 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 33200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
100,626	198,419	314,019	305,158	415,492	49,9	50,2	33296,88	0,05	16,87
101,892	134,135	233,711	225,375	331,019	49,9	50,2	33201,82	0,93	15,38
102,502	120,113	180,233	172,536	251,977	50,1	50,4	33312,54	1,59	13,53
102,024	116,026	160,433	152,895	199,556	50,1	50,4	33392,22	1,96	12,11
100,265	111,836	143,944	137,154	165,623	50,3	50,5	33628,34	2,39	10,69
99,499	107,803	133,186	126,146	146,332	50,3	50,4	33316,69	2,86	10,16
101,928	103,947	121,741	114,407	126,181	50,1	50,4	32756,26	3,19	9,33
102,323	102,214	117,559	110,099	118,480	50,6	50,6	32852,99	3,70	8,99

Tabela I.184 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 39800 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,656	181,812	274,671	268,590	355,736	49,8	50,0	39834,93	0,05	17,02
100,994	122,092	199,576	193,267	274,849	50,0	50,3	39633,42	1,08	15,01
99,826	111,495	151,018	142,530	203,982	50,0	50,3	39819,72	1,47	13,52
104,879	112,196	135,670	125,333	141,759	50,1	50,3	39168,23	1,90	11,50

Tabela I.185 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 26500 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,502	616,715	747,413	744,893	874,524	50,3	50,5	26452,11	0,05	16,41
500,748	581,231	708,928	705,410	833,282	50,6	50,8	26462,01	1,23	15,72
499,933	570,088	693,149	688,655	814,025	50,3	50,5	26643,32	1,76	15,53
500,192	555,976	667,791	662,491	782,169	49,8	50,1	26676,10	2,48	15,19
502,157	548,187	650,589	644,731	758,745	50,1	50,4	26532,47	3,03	14,85
502,160	538,774	627,885	621,153	725,174	50,4	50,6	26664,46	3,68	14,23
501,746	531,392	604,248	597,169	683,441	49,7	50,0	26554,74	4,39	13,58
504,174	533,731	602,113	595,203	673,001	49,0	49,2	26427,90	5,05	13,22
507,894	531,739	587,657	581,260	644,531	49,8	50,0	26421,26	5,88	12,33

500,473	521,162	573,001	566,175	626,135	50,0	50,2	27164,12	7,12	12,25
503,236	524,801	577,570	570,929	630,092	50,0	50,3	27115,52	8,60	12,29
506,848	518,210	550,892	544,392	579,168	50,1	50,3	27018,23	11,93	10,90
499,017	506,791	532,908	526,425	552,973	50,2	50,4	26137,63	13,83	10,16

Tabela I.186 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 33200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,186	598,114	711,187	702,181	809,695	49,9	50,2	33319,67	0,05	17,11
501,344	582,320	691,615	682,265	787,151	50,0	50,2	33028,99	1,19	16,67
498,350	565,525	671,022	661,668	763,495	50,0	50,3	33094,42	1,81	16,51
500,474	549,874	649,080	639,938	738,955	50,1	50,3	33237,43	2,65	15,90
500,382	542,981	631,942	627,038	719,149	50,3	50,4	33386,47	3,24	14,89
501,662	536,408	613,412	608,136	689,545	50,3	50,5	32952,26	3,99	14,26
498,336	525,551	587,743	582,166	646,013	50,1	50,3	33385,55	4,64	13,62
500,221	524,005	578,560	572,668	628,459	50,1	50,4	33213,34	5,35	12,97
502,297	521,856	566,664	560,115	604,164	50,2	50,4	33081,91	6,07	12,16
501,197	518,994	560,704	553,921	592,882	50,3	50,4	33313,80	6,60	11,82
500,904	516,005	551,456	544,489	575,262	50,1	50,3	33315,58	7,53	11,39
502,203	515,457	547,734	540,661	568,192	49,6	49,7	33260,56	8,28	11,05
499,616	511,039	540,778	533,724	557,643	49,5	49,6	33657,90	9,18	10,86
499,832	510,595	538,380	531,209	553,221	49,6	49,7	33520,25	9,83	10,65
502,334	511,106	536,849	529,710	549,310	49,6	49,7	33259,68	10,77	10,40
501,195	509,161	532,295	525,219	542,685	49,7	49,8	33084,68	11,41	10,39
501,157	507,675	528,651	521,340	536,102	49,8	49,9	33158,92	12,31	9,87
498,730	504,601	524,497	516,927	530,073	49,9	50,0	33413,44	12,84	9,74
499,287	505,027	524,225	516,509	528,953	50,0	50,3	33310,21	13,50	9,69
505,366	510,061	528,527	520,840	532,206	50,0	50,3	32914,40	14,86	9,60
500,150	502,638	517,650	509,254	515,796	50,1	50,3	33529,57	16,59	9,63
498,855	499,146	510,978	502,144	504,383	50,3	50,4	33737,70	18,60	9,15

Tabela I.187 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 39800 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 0^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,341	588,737	686,257	680,791	774,281	50,0	50,3	38618,24	0,05	17,06
501,673	585,764	682,696	677,300	770,567	50,3	50,4	38441,55	0,85	16,81
501,085	567,711	662,569	657,050	747,791	50,4	50,5	38496,02	1,90	16,46
500,378	541,856	630,947	625,258	712,541	50,6	50,7	38490,49	2,78	15,54
503,315	534,465	613,940	608,151	690,784	50,2	50,4	38411,41	3,34	15,01
503,097	527,338	597,190	591,148	664,339	49,6	49,9	38512,78	3,86	14,64
501,744	522,679	589,458	583,393	653,407	50,1	50,3	38605,62	4,28	14,31
499,929	517,479	573,742	567,513	626,917	50,3	50,5	38259,51	5,05	13,57
498,607	512,621	557,743	550,690	602,164	50,0	50,2	38465,59	5,50	13,06
502,012	511,863	541,262	532,583	555,898	49,9	50,1	38422,30	6,69	11,74

499,588	505,694	527,189	517,436	530,294	50,0	50,3	38596,38	7,67	11,17
501,931	506,639	525,085	515,224	523,655	50,1	50,3	38156,58	8,89	10,69
500,999	503,723	519,220	508,718	513,193	50,3	50,4	38300,06	10,02	10,45

Tabela I.188 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 16900 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,524	151,021	207,793	203,857	263,551	49,4	49,6	17036,78	0,05	8,72
101,178	102,238	113,042	106,126	123,025	49,8	50,0	17021,99	0,96	6,46
99,708	96,409	99,239	92,611	98,210	49,7	49,9	17024,82	1,97	5,76

Tabela I.189 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 21200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,857	141,853	193,379	186,154	237,710	49,7	49,9	21304,03	0,05	8,88
99,959	101,382	116,237	108,958	126,014	49,8	50,0	21344,48	1,09	6,77
97,888	97,605	109,364	101,929	116,120	49,7	49,9	21302,76	1,29	6,59
101,567	99,057	105,669	98,505	107,447	50,0	50,1	21089,35	1,96	6,25
100,607	96,274	101,658	94,127	100,197	49,8	50,0	21350,39	2,73	6,07

Tabela I.190 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 25400 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
101,016	136,548	178,341	170,042	211,714	49,7	49,9	25451,42	0,06	8,80
99,585	100,803	111,520	102,617	116,233	49,6	49,8	25300,14	0,82	6,44
99,902	94,393	93,898	83,326	80,041	49,9	50,0	25747,82	1,54	5,47

Tabela I.191 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 16900 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,856	551,919	608,114	603,524	658,913	50,1	50,3	16924,58	0,05	8,78
499,652	517,777	565,775	559,206	609,539	50,0	50,3	17097,94	1,21	8,38
500,650	511,604	544,351	537,802	574,313	50,1	50,3	16944,64	2,01	7,74
500,476	508,169	532,376	525,333	551,176	50,1	50,3	17009,00	2,51	7,22
500,481	506,200	524,514	517,592	535,700	50,1	50,3	16710,20	3,01	6,94

500,332	504,827	519,980	513,166	526,545	50,1	50,3	16911,21	3,47	6,81
499,213	502,577	513,988	507,667	516,392	50,1	50,3	16866,41	4,14	6,62
500,773	502,668	511,621	505,504	512,239	50,1	50,3	16987,50	4,90	6,46
499,250	500,641	508,588	502,386	507,751	50,1	50,3	17070,40	5,56	6,40
500,918	501,624	508,591	502,505	506,430	50,1	50,3	17023,31	6,35	6,31
500,731	500,492	506,400	500,236	503,050	50,1	50,3	16683,02	7,33	6,23

Tabela I.192 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 21200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
497,553	540,720	591,635	584,144	631,708	50,0	50,3	21499,42	0,05	9,06
501,960	526,678	570,266	562,729	606,140	50,2	50,3	21214,81	1,00	8,64
499,670	519,698	555,728	548,057	584,444	50,3	50,5	21365,29	1,32	8,37
500,207	513,995	541,298	533,531	558,910	50,1	50,3	21165,46	1,94	7,88
500,069	510,943	534,959	527,303	549,327	50,3	50,5	21176,19	2,32	7,66
499,938	508,695	530,155	522,454	540,643	50,4	50,5	21078,85	2,66	7,46
500,754	507,325	525,282	517,391	530,079	50,0	50,2	21148,12	3,11	7,33
501,668	506,378	519,862	511,827	520,256	49,2	49,5	21342,93	3,50	7,20
500,980	504,973	516,963	508,998	515,928	49,7	49,9	21163,18	4,02	7,01
500,656	503,147	512,718	504,647	509,276	49,7	49,9	21148,10	4,70	6,84
496,132	496,320	502,056	493,564	493,472	49,8	50,0	21597,23	5,89	6,55

Tabela I.193 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 2400 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 25400 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,295	535,393	577,601	569,485	607,892	49,9	50,0	25364,95	0,05	9,04
499,925	518,155	558,792	550,965	587,478	50,3	50,4	25299,81	0,91	8,69
500,587	514,675	551,260	544,993	579,323	50,3	50,4	25677,93	1,35	8,17
498,049	505,620	537,225	530,297	557,901	50,4	50,5	25681,43	2,02	7,82
500,662	503,650	531,191	524,022	546,880	50,4	50,5	25390,82	2,58	7,55
501,543	502,424	512,417	503,701	510,105	50,5	50,6	25438,41	2,96	6,72
500,005	498,671	502,615	493,045	491,437	50,5	50,7	25561,52	3,73	6,13
500,295	535,393	577,601	569,485	607,892	49,9	50,0	25364,95	0,05	9,04

Tabela I.194 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 26500 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
101,529	212,044	338,504	332,556	458,580	49,8	50,0	26553,12	0,04	16,39
98,783	130,088	232,844	224,579	344,680	50,0	50,3	26600,55	1,04	14,83

98,941	113,051	166,942	155,185	243,837	49,9	50,2	26637,44	1,46	13,06
101,146	108,513	139,112	128,602	170,373	49,9	50,2	26469,28	1,77	11,17
100,146	104,756	127,064	117,217	146,743	49,8	50,1	26558,64	1,99	10,54
100,878	101,313	114,536	105,554	120,864	49,7	49,9	26503,03	2,56	9,62
99,782	97,642	108,611	99,792	111,454	49,5	49,9	26696,68	3,00	9,34
101,244	97,719	106,817	97,846	106,941	49,5	49,8	26604,91	3,44	9,10

Tabela I.195 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 33200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
97,917	193,960	307,726	296,119	405,254	50,0	50,1	33458,66	0,05	16,82
100,147	136,438	239,488	227,820	334,627	50,5	50,8	33204,00	0,95	15,57
101,016	112,716	167,520	156,667	241,974	50,6	50,8	33248,45	1,62	13,43
102,578	108,061	141,532	131,011	168,321	49,7	50,0	33079,86	2,00	11,42
100,856	101,699	123,502	113,349	137,573	50,1	50,3	33258,69	2,49	10,65
98,939	96,664	113,195	102,932	118,858	50,1	50,3	33577,02	3,01	10,16
99,702	95,889	109,622	99,239	110,948	50,1	50,3	33564,58	3,45	9,91
107,744	102,269	113,084	102,708	110,188	50,1	50,3	32905,92	4,36	9,55

Tabela I.196 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 200 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 39800 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
99,960	177,368	271,555	259,400	348,177	50,1	50,3	39850,02	0,04	16,76
100,445	128,394	215,164	205,662	290,178	50,1	50,3	39803,08	0,89	15,44
101,927	108,960	172,097	162,410	232,781	50,0	50,3	39717,88	1,52	13,99
108,617	111,409	128,668	114,140	127,897	50,0	50,2	38959,11	1,97	10,70

Tabela I.197 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,0,8,BEP} = 26500 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
499,795	613,539	740,056	734,047	859,128	49,9	50,2	26635,76	0,04	16,69
499,735	603,247	728,814	722,404	846,711	50,0	50,3	26555,92	1,05	16,19
501,316	577,223	698,507	691,101	814,265	50,0	50,3	26562,91	1,67	15,79
500,258	573,640	691,962	684,323	806,640	50,1	50,4	26688,01	1,93	15,65
501,825	562,694	674,925	667,348	785,806	50,3	50,5	26583,48	2,51	15,33
500,933	547,705	653,170	645,129	760,097	50,4	50,7	26488,54	2,97	15,21
500,371	536,230	628,485	619,735	725,859	49,6	49,9	26700,80	3,53	14,89
501,398	533,953	621,432	612,344	714,210	50,0	50,3	26554,83	3,85	14,60
499,933	524,426	595,705	585,536	672,229	50,1	50,4	26806,34	4,60	13,84

500,394	521,120	580,360	569,779	643,115	50,1	50,4	26528,64	5,04	13,12
500,900	517,566	561,343	551,049	602,560	50,2	50,4	26588,11	5,92	12,11
500,182	513,627	548,164	538,480	575,019	50,3	50,5	26532,61	6,80	11,46
501,757	512,068	537,863	529,132	555,628	49,8	50,1	26457,01	7,76	10,84
500,402	509,383	533,298	524,548	547,586	50,0	50,3	26613,25	8,48	10,57
500,952	507,888	527,564	519,448	536,837	50,1	50,4	26627,45	9,82	10,20
501,436	505,392	520,566	512,659	524,575	50,2	50,4	26603,28	12,15	9,83
501,223	503,791	516,621	508,571	518,011	50,3	50,4	26622,74	14,07	9,67

Tabela I.198 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,BEP} = 33200 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$T_s$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
500,833	597,851	712,676	701,089	809,696	50,0	50,2	33116,79	0,05	17,08
497,792	587,112	699,399	687,383	793,877	50,5	50,8	33613,77	0,88	16,73
499,920	578,793	689,843	677,750	783,754	50,3	50,4	33254,60	1,43	16,52
501,497	549,563	654,672	642,401	745,532	49,8	50,0	33319,90	2,34	15,99
501,206	536,631	633,708	623,153	723,278	49,8	50,0	33313,08	3,25	15,63
500,153	529,722	622,385	612,048	710,050	50,0	50,2	33306,78	3,76	15,28
499,146	521,522	586,521	575,148	659,641	50,2	50,4	33479,40	4,49	14,27
502,019	520,336	571,459	560,442	621,314	50,3	50,5	33235,87	5,21	13,17
501,166	515,803	562,732	552,083	602,762	50,1	50,3	33124,44	5,96	12,69
502,231	514,099	556,528	545,561	583,886	50,2	50,3	33125,07	6,82	12,06
499,907	508,382	541,406	530,970	557,957	50,3	50,5	33235,10	8,16	11,41
497,854	502,750	527,114	516,445	534,260	50,3	50,4	33544,27	9,83	10,87
501,298	504,626	526,347	516,027	529,443	50,4	50,5	33194,95	11,42	10,57
500,876	502,316	520,011	509,877	519,289	50,5	50,7	33369,89	12,81	10,35
500,205	500,007	515,489	505,016	511,574	50,6	50,8	33268,15	14,61	10,06

Tabela I.199 – Teste de desempenho bifásico viscoso,  $\omega = 3500 \text{ rpm}$ ,  $P_1 = 600 \text{ kPa}$ ,  $T_e = 50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu = 76 \text{ cP}$ ,  $\dot{m}_{L,1,2,BEP} = 39800 \text{ kg/h}$ ,  $\rho = 1227 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta = 90^\circ$ .

$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$P_5$ [kPa]	$T_e$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$T_s$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\dot{m}_L$ [kg/h]	$\dot{m}_G$ [kg/h]	$T_{eixo}$ [N.m]
501,888	581,034	670,556	661,725	745,919	50,0	50,2	39806,73	0,04	17,07
500,362	575,119	662,473	653,644	735,750	50,1	50,4	39628,23	1,04	16,96
498,612	568,736	654,301	645,296	725,497	50,3	50,5	39646,29	1,53	16,88
501,654	559,305	643,757	634,610	713,805	50,3	50,4	39889,58	2,06	16,71
500,471	534,931	619,269	610,236	689,093	49,7	49,9	39890,98	2,59	16,02
500,483	531,044	614,958	606,124	684,734	50,0	50,2	39915,33	3,01	15,77
497,987	521,898	602,957	594,137	670,656	50,0	50,3	39836,68	3,53	15,41
499,971	520,607	597,152	588,407	663,106	50,1	50,4	39822,68	3,96	15,19
499,578	513,204	582,462	573,727	643,930	50,3	50,4	39999,23	4,59	14,76
493,995	501,291	567,312	558,390	622,171	50,0	50,2	40333,35	5,03	14,53
498,852	502,345	524,373	511,591	526,236	50,1	50,4	39768,15	6,09	11,95
499,696	501,230	516,940	503,136	510,884	50,3	50,4	39679,77	6,59	11,47
500,628	497,942	506,230	491,058	488,626	50,3	50,5	39720,22	7,17	10,92

## ANEXO II - VÍDEOS

- **Vídeo 1:** Padrão *Bubble Flow*, água-ar,  $q_L = 5,25 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,57 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 2:** Padrão *Agglomerated Bubble Flow*, água-ar,  $q_L = 4,17 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,73 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo
- **Vídeo 3:** Padrão *Gas Pocket Flow*, água-ar,  $q_L = 2,73 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 1,11 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 4:** Padrão *Segregated Flow*, água-ar,  $q_L = 1,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 2,49 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 5:** Ponto IM1, água-ar,  $q_L = 5,25 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,57 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 6:** Ponto IM2, água-ar,  $q_L = 4,89 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,61 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 7:** Ponto IM3, água-ar,  $q_L = 4,55 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,65 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 8:** Ponto IM4, água-ar,  $q_L = 4,17 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,73 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 9:** Ponto IM5, água-ar,  $q_L = 3,69 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,83 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.



- **Vídeo 10:** Ponto IM6, água-ar,  $q_L = 3,39 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,89 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 11:** Ponto IM7, água-ar,  $q_L = 3,10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,98 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 12:** Ponto IM8, água-ar,  $q_L = 2,73 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 1,11 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 13:** Ponto IM9, água-ar,  $q_L = 2,37 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 1,26 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 14:** Ponto IM10, água-ar,  $q_L = 1,92 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 1,57 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 15:** Ponto IM11, água-ar,  $q_L = 1,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,050 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 2,49 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 16:** Ponto IM12, água-ar,  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,010 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,20 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 17:** Ponto IM13, água-ar,  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,089 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 1,67 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 18:** Ponto IM14, água-ar,  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,099 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 1,85 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 19:** Ponto IM15, água-ar,  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,106 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 1,98 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.

- **Vídeo 20:** Ponto IM16, água-ar,  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,150 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 2,78 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 21:** Ponto IM17, água-ar,  $q_L = 3,20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,228 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 4,17 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 22:** Ponto IM27, água/glicerina-ar,  $q_L = 4,58 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,14 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 23:** Ponto IM28, água/glicerina-ar,  $q_L = 4,33 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,15 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 24:** Ponto IM29, água/glicerina-ar,  $q_L = 4,08 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,17 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 25:** Ponto IM30, água/glicerina-ar,  $q_L = 3,85 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,18 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 26:** Ponto IM31, água/glicerina-ar,  $q_L = 3,45 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,20 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 27:** Ponto IM32, água/glicerina-ar,  $q_L = 3,22 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,21 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 28:** Ponto IM33, água/glicerina-ar,  $q_L = 3,01 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,22 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 29:** Ponto IM34, água/glicerina-ar,  $q_L = 2,67 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,25 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.

- **Vídeo 30:** Ponto IM35, água/glicerina-ar,  $q_L = 2,31 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,28 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 31:** Ponto IM36, água/glicerina-ar,  $q_L = 1,80 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,36 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 13 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 32:** Ponto IM48, água/glicerina-ar,  $q_L = 2,54 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,24 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 52 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 33:** Ponto IM49, água/glicerina-ar,  $q_L = 2,37 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,26 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 52 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo
- **Vídeo 34:** Ponto IM50, água/glicerina-ar,  $q_L = 2,17 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,27 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 52 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 35:** Ponto IM51, água/glicerina-ar,  $q_L = 1,93 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,0125 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,31 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ ,  $\mu = 52 \text{ cP}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 36:** Ponto IM52, água-ar,  $q_L = 3,10 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,49 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 37:** Ponto IM53, fluido 1-ar,  $q_L = 3,08 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,47 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo
- **Vídeo 38:** Ponto IM54, fluido 3-ar,  $q_L = 3,19 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,48 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 39:** Ponto IM55, água-ar,  $q_L = 1,64 \text{ m}^3/h$ ,  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg/h}$ ,  $\lambda = 0,92 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.

- **Vídeo 40:** Ponto IM56, fluido 1-ar,  $q_L = 1,55 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,92 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo
- **Vídeo 41:** Ponto IM57, fluido 3-ar,  $q_L = 1,68 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,025 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 0,89 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 42:** Ponto IM58, água-ar,  $q_L = 3,17 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 1,43 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 43:** Ponto IM59, fluido 1-ar,  $q_L = 3,23 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 1,35 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 44:** Ponto IM60, fluido 3-ar,  $q_L = 3,08 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 1,41 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 45:** Ponto IM61, água-ar,  $q_L = 1,81 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 2,48 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo
- **Vídeo 46:** Ponto IM62, fluido 1-ar,  $q_L = 1,64 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 2,60 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.
- **Vídeo 47:** Ponto IM63, fluido 3-ar,  $q_L = 1,71 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\dot{m}_G = 0,075 \text{ kg}/\text{h}$ ,  $\lambda = 2,50 \%$ ,  $P_1 = 150 \text{ kPa}$ ,  $\omega = 900 \text{ rpm}$ , taxa de aquisição 2000 fps, taxa de reprodução 10 fps, tempo real de vídeo 0,1 segundo.